Vol.11, No.4, Winter 2023, pp.69-98 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2022.75050.1168 Open access

Evaluating the Efficiency of Bivariate Models in Determining Subsidence Susceptibility of Kashan Plain Aquifer

Narges Saghazadeh[a], Hoda Ghasemieh[b*], Ebrahim Omidvar[b], Yaser Maghsoudi[c]

[a] *PhD Graduated Students in Watershed Management Engineering and Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran*

[b] *Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran*

[c] *Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran*

Received: 4 February 2022 ***Revised: 19 May 2022*** ***Accepted: 29 May 2022***

Abstract

Land subsidence is one of the most important environmental problems that affects agriculture and urban infrastructure. In order to plan for mitigating the damages caused by land subsidence, it is necessary to identify high-risk and prone areas for this phenomenon specially in different plains of Iran. The main purpose of this research was zoning the land subsidence in Kashan aquifer using Dempster-Schafer, Weight of Evidence, Shannon Entropy, and Frequency Ratio. To conduct this research, 14 factors affecting the occurrence of subsidence including elevation, slope, slope direction, surface curvature, distance from stream, distance from fault, distance from road, lithology, land use, longitudinal and transverse curvature, water table changes, distance from mining and well density in aquifer surface were used. Then, determining 108 subsidence positions and 108 non-subsidence positions at the aquifer level, these points were randomly classified as 30% and 70% as validation data and test data, respectively. To evaluate each of the models, the ROC curve was used. The results showed that among the used methods based on the ROC curve and the amount of AUC, the Frequency Ratio method (training: 0.84 and validation: 0.89) performed best and is introduced as the best method for predicting areas with subsidence sensitivity in studied area. Shannon Entropy, Dempster-Schafer and Weight of Evidence were also ranked next, respectively. The results of this study can be used by provincial managers to reduce the damage caused by land subsidence and to determine areas with subsidence sensitivity.

Keywords: Groundwater, Kashan plain, Bivariate approach, Subsidence, Machine learning

*. Corresponding author: Hoda Ghasemieh E-mail: h.ghasemieh@Kashanu.ac.ir Tel: + 989132613779

How to cite this Article: Saghazadeh, N., Ghasemieh, H., Omidvar, E., & Maghsoudi, Y., (2023). Evaluating the efficiency of bivariate models in determination of subsidence susceptibility of Kashan Plain Aquifer. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 11*(4), 69-98.

DOI: 10.22067/geoeh.2022.75050.1168

Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75050.1168

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۹۸-۶۹
مقاله پژوهشی
ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

ارزیابی کارایی مدل‌های دو متغیره در تعیین حساسیت‌پذیری فرونشست آبخوان دشت کاشان

نرگس سقازاده- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
هدی قاسمیه[1]- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
ابراهیم امیدوار- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
یاسر مقصودی- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۲۹ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۸

چکیده

فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی است که بر کشاورزی و زیرساخت‌های شهری تأثیر می‌گذارد. لذا به‌منظور برنامه‌ریزی برای کاهش خطرات ناشی از فرونشست، شناسایی مناطق پرخطر و مستعد وقوع این پدیده در دشت‌های مختلف ایران ضروری است. هدف اصلی این تحقیق، حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در آبخوان کاشان با استفاده از روش‌های دمپستر- شفر، وزن‌دهی شواهد، آنتروپی شانون و نسبت فراوانی است. برای انجام این تحقیق از ۱۴ عامل مؤثر بر وقوع فرونشست شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، لیتولوژی، کاربری اراضی، انحنای طولی و عرضی، تغییرات سطح ایستابی، فاصله از معدن و تراکم چاه در سطح آبخوان استفاده شد. آنگاه پس از تعیین ۱۰۸ موقعیت فرونشست و نیز ۱۰۸ موقعیت عدم فرونشست در سطح آبخوان، این نقاط به‌صورت تصادفی و به نسبت ۳۰ و ۷۰ درصد به‌ترتیب به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های آزمون طبقه‌بندی شدند و برای ارزیابی هرکدام از مدل‌ها از منحنی تشخیص

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۳۲۶۱۳۷۷۹ Email: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

سقازاده, نرگس, قاسمیه, هدی, امیدوار, ابراهیم, مقصودی, یاسر. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل¬های دو متغیره در تعیین حساسیت پذیری فرونشست آبخوان دشت کاشان. جغرافیا و مخاطرات محیطی, ۱۱(۴). صص ۹۸-۶۹
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75050.1168

عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. نتایج نشان داد که از بین روش‌های مورداستفاده بر اساس منحنی ROC و میزان AUC، روش نسبت فراوانی (آموزش: ۰/۸٤ و اعتبارسنجی: ۰/۸۹) بهترین عملکرد را داشته است و به‌عنوان بهترین روش پیش‌بینی مناطق دارای حساسیت فرونشست در منطقه مطالعاتی معرفی می‌شود. روش‌های آنتروپی شانون، دمپستر- شفر و وزن‌دهی شواهد نیز به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق برای کاهش خسارات ناشی از وقوع فرونشست زمین و تعیین مناطق بالقوه فرونشست، قابل‌استفاده برای مدیران استانی خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، دشت کاشان، روش‌های دومتغیره، فرونشست، یادگیری ماشینی

۱- مقدمه

فرونشست زمین[۱] که باعث تغییر شکل سطح زمین می‌شود، پدیده خطرناکی است که می‌تواند خسارات بزرگی به زمین وارد کند (قربان‌زاده[۲] و همکاران، ۲۰۱۸). این پدیده ازجمله مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی است که موجب تغییر در توپوگرافی سطح زمین می‌شود و این موضوع ناشی از ضعف ساختاری لایه‌های زیرزمینی است و در بیشتر مواقع برگشت‌ناپذیر است (اشرف و کاوود[۳]، ۲۰۱۵).

در دهه‌های اخیر، گزارش‌هایی اعلام شده که تخلیه آبخوان بر کاهش کیفیت آب، فرونشست زمین و ترک خوردن زمین تأثیر گذاشته است (ژو و لی[٤]، ۲۰۱۱). فرونشست زمین یک پدیده جهانی است که از فرایندهای طبیعی مانند تراکم خودکار و فعالیت‌های زمین‌ساختی و همچنین فعالیت‌های انسانی که منجر به خروج و بهره‌برداری بی‌رویه از آب، نفت و سایر سیالات از درون زمین می‌شود، ناشی می‌شود و می‌تواند آسیب جدی به زیرساخت‌های اقتصادی بزند (گالوی[۵] و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیانگ[٦] و همکاران، ۲۰۲۲).

به نظر می‌رسد که در بین عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست، برداشت بیش‌ازحد مجاز از منابع آب زیرزمینی، عامل اصلی ایجاد فرونشست در بیشتر دشت‌های ایران باشد؛ به‌گونه‌ای که در بیست و یکمین کارگروه ملی فرونشست زمین و حفاظت از منابع آب زیرزمینی، بیشتر دشت‌های کشور در معرض خطر فرونشست بر اثر برداشت بی‌رویه از ذخایر آب زیرزمینی تشخیص داده شدند (رنجبر و جعفری، ۱۳۸۸). طی پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققین، بهره‌برداری و استخراج آب‌های زیرزمینی در چندین کشور در سراسر زمین شامل مکزیک، ایتالیا، ایران، ویتنام و

1 Land Subsidence
2 Ghorbanzadeh
3 Ashraf & Cawood
4 Zhou & Li
5 Galloway
6 Liang

چین، نقش مهمی در ایجاد فرونشست زمین ایفا کرده است (یو[۱] و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژو[۲] و همکاران، ۲۰۲۰؛ تای[۳] و همکاران، ۲۰۲۱؛ نوین[٤] و همکاران، ۲۰۲۲. اکبری، ۱٤۰۰؛ قره‌چلو و همکاران، ۱٤۰۰).

در سال‌های اخیر، روش‌های یادگیری ماشینی[٥] و روش‌های دومتغیره[٦] همراه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی در مقایسه با روش‌های سنتی در زمینه تعیین مناطق حساس به فرونشست که زمان‌بر هستند، دارای کارایی بالایی بوده‌اند و باعث افزایش دقت و سرعت در زمینه ارزیابی و پتانسیل فرونشست شده‌اند. فاکتورهای مختلفی از طیف وسیعی از پارامترهای محیطی از قبیل فاکتورهای هیدرولوژیکی، فاکتورهای اقلیمی، فاکتورهای توپوگرافیک، فاکتورهای اکولوژیک، فاکتورهای ژئولوژیکی و فاکتورهای انسانی بر میزان حساسیت فرونشست تأثیرگذار هستند. در این میان، روش‌های یادگیری ماشینی (مدل‌های جنگل تصادفی[۷]، حداکثر آنتروپی[۸]، شبکه عصبی مصنوعی[۹] و ماشین بردار پشتیبان[۱۰]) و دومتغیره (مدل‌های نسبت فراوانی[۱۱]، دمپستر- شفر[۱۲]، وزن‌دهی شواهد[۱۳] و رگرسیون خطی[۱٤] و لجستیک[۱٥]) وجود دارد که به محققان اجازه می‌دهد نقشه حساسیت فرونشست را تهیه کنند و با تعیین روابط آماری بین عوامل محیطی و توزیع مکانی فرونشست‌ها، احتمال مکانی وقوع فرونشست را ارزیابی و پیش‌بینی کنند. در سال‌های اخیر از تکنیک‌های رایج ازجمله یادگیری ماشین و روش‌های آماری و دو متغیره برای تخمین میزان فرونشست و بررسی علل این پدیده استفاده شده است. به‌عنوان‌مثال پرادهان و ابوخاریما[۱٦] (۲۰۱٤) در تحقیقی، میزان فرونشست زمین را در دره کیتاپراک مالزی با استفاده از GIS و روش‌های سنجش‌ازدور برآورد نمودند. در این تحقیق، ۱٤ شاخص به‌عنوان عوامل مؤثر بر میزان فرونشست در نظر گرفته شد. آن‌ها به‌منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست از دو روش تابع باور شهودی[۱۷] و نسبت فراوانی استفاده کردند و ارزیابی مدل‌ها در این پژوهش با استفاده از سطح زیر منحنی ROC[۱۸] (AUC)[۱۹] اعتبارسنجی شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل

1 Yu
2 Zhu
3 Ty
4 Nguyen
5 Machine Learning
6 Bivariate
7 RF: Random Forest
8 MF: Maximum Entropy
9 ANN: Artificial Neural Network
10 SVM: Support Vector Machine
11 FR: Frequency Ratio
12 Dempster–Shafer
13 WOF: Weight Of Evidence
14 Linear regression
15 Logistic Regression
16 Pradhan & Abokharima
17 EBF: Evidential Belief Function
18 ROC: Relative Operating Curve
19 AUC: Area Under Curve

نسـبت فراوانی قادر به ایجاد نرخ پیش‌بینی ۷۱/۱٦ درصد است، درحالی‌که مدل تابع باور شهودی پیش‌بینی بهتری را با نرخ ۷۳/٦۳ درصـد نشـان داد. تین‌بویی[1] و همکاران (۲۰۱۸) با اسـتفاده از چهار مدل رگرسـیون لجستیک بیزین[2]، ماشـین بردار پشتیبان، درخت مدل لجستیک[3] و درخت تصمیم متناوب[4] و ۸ عامل مؤثر، حساسیت فرونشست زمین در کره جنوبی را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسـیدند که مدل رگرسیون لجستیک بیزین از دقت بالاتری برخوردار بوده اسـت. همچنین برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را عامل فرونشست در منطقه موردمطالعه بیان کردند. رحمتی[5] و همکاران (2019a) به بررسی خطر فرونشست در دشت همدان با استفاده از چهار مدل درخت تصمیم قانون محور[6]، درخت رگرسـیون تقویت شـده[7]، رگرسـیون درختی و طبقه‌بندی[8] و جنگل تصـادفی پرداختند. آن‌ها برای انجام مدل‌سـازی و تهیه نقشه خطر فرونشست از شش عامل استفاده کردند. درنهایت بیان داشتند که روش جنگل تصادفی بهترین نتیجه را داشته و کاهش سطح آب زیرزمینی، لیتولوژی و فاصله از آبراهه‌ها مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرونشست بوده‌اند.

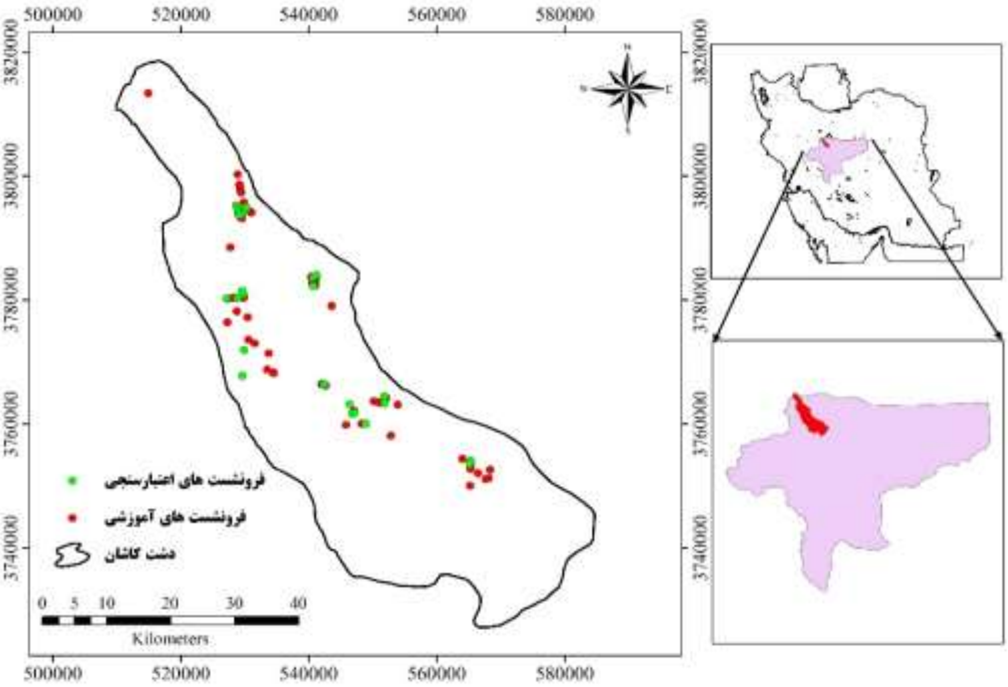
فرونشـسـت در دشت کاشان برای اولین بار در سال ۱۳۷۰ به‌صورت شکاف‌هایی در بخش‌هایی از دشت مشاهده گردید که باعث تخریب واحدهای مسـکونی و زمین‌های کشاورزی گردید (قاضی‌فرد و همکاران، ۱۳۹۰). علت این عوارض در آن زمان، اسـتخراج بی‌رویه آب زیرزمینی عنوان شـد. اما به دلیل گسـترش شکاف‌ها و پیشروی آن‌ها در بسـیاری از نقاط دشـت، بررسـی جامع این پدیده به‌منظور شـناخت کامل این عوارض، تعیین محدوده تأثیرپذیر، پیش‌بینی نحوه گسـترش و در صورت امکان، جلوگیری از توسعه و تشدید آن‌ها، پیشنهاد گردید (مصلحی بهارانچی و همکاران، ۱۳۹۰). لذا در این تحقیق تلاش می‌شود با استفاده از مدل‌های دومتغیره، نقشه‌های حساسیت فرونشست در آبخوان دشـت کاشـان تهیه شود تا مناطق پرخطر شناسایی شوند. در نظر گرفتن ١٤ عامل مؤثر و به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌های دو متغیره برای تهیه نقشـه‌های حسـاسـیت‌پذیری فرونشـسـت در آبخوان دشت کاشان، از نوآوری‌های تحقیق حاضر محسوب می‌شود.

1 Tien Bui
2 BLR: Bayesian Logistic Regression
3 LMT: Logistic Model Tree
4 ADT: Alternate Decision Tree
5 Rahmati
6 RBDT: Rule-Based Decision Tree
7 BRT: Boosted Regression Trees
8 CART: Classification And Regression Tree

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه موردمطالعه

حوزه آبخیز دشــت کاشان، در جنوب حوزه آبخیز بزرگ دریاچه نمک بین طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ٥٤ دقیقه تا ٥٢ درجه و ٦ دقیقه شــرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ٣٦ دقیقه تا ٣٤ درجه و ۳۰ دقیقه شــمالی واقع شــده اســت. این حوضــه دارای وســعت ٦٩٥٠ کیلومترمربع اســت. دشــت کاشان در دامنه کوه‌های کرکس و حاشیه کویر مرکزی ایران در حدود ٢٤٠ کیلومتری جنوب تهران و بین طول‌های جغرافیایی ٥١ و ٥٢ درجه شــرقی و عرض‌های ٣٣/٤٠ و ٣٤/٣٠ درجه شمالی درجه قرار دارد (شکل ۱). آبخوان دشت کاشان، دارای وسعت ٢٢١٧٦٣/٤ هکتار است که البته بخش‌هایی از آن به دلیل شــور بودن آب‌های زیرزمینی، قابل‌اســتفاده نیست. دشت کاشان، به‌صورت یک دره باریک دارای امتداد شــمال غربی- جنوب شــرقی است. حداقل و حداکثر ارتفاع دشت کاشان از سطح دریا، به‌ترتیب ۸۰۰ و ۱۲۰۰ متر در قســمت حاشــیه شرقی و غربی دشت کاشان است (میرزاوند و همکاران، ۱۳۹۷). دامنه تغییرات ارتفاعی منطقه مطالعاتی در این پژوهش نیز بین ۸۰۳ الی ١٦٧١ متر است و از شمال و شمال غربی منطقه مطالعاتی به سمت جنوب و جنوب غربی، ارتفاع از سطح دریا در حال افزایش است.

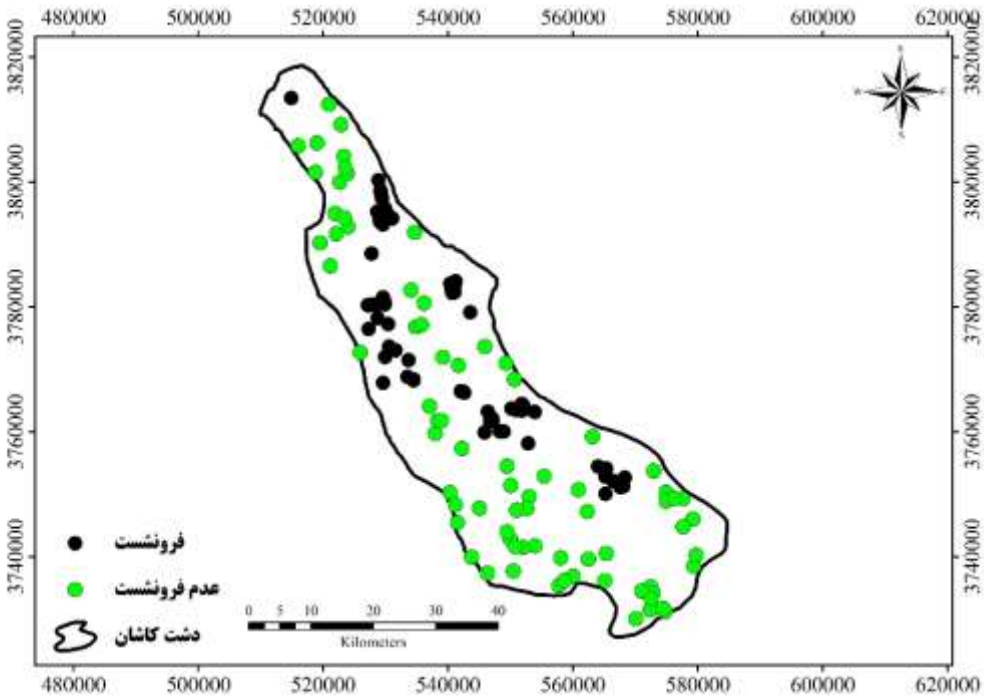


شکل ۱- موقعیت دشت کاشان در استان اصفهان و ایران

۲-۲- روش‌شناسی تحقیق

۲-۲-۱- تهیه نقشه پراکنش نقاط وقوع و عدم وقوع فرونشست

ابتدا به‌منظور تهیه نقشه پراکنش نقاط وقوع و عدم وقوع فرونشست، بازدیدهای میدانی از سطح دشت به‌ویژه در مناطقی که چاه‌های پیزومتری و بهره‌برداری وجود داشت، انجام گرفت و درنهایت تعداد ۱۰۸ مورد فرونشست مشخص شد که با استفاده از GPS موقعیت جغرافیایی این نقاط برداشت و ثبت شد. به‌منظور ارزیابی مدل‌های دو متغیره علاوه بر این ۱۰۸ مورد، تعداد ۱۰۸ نقطه فاقد فرونشست نیز طی عملیات صحرایی ثبت شد (شکل ۲). ذکر این نکته ضروری است که به‌منظور انتخاب اولیه این نقاط، ابتدا از نقشه میزان فرونشست دشت که در مطالعه‌ای موازی به روش تداخل‌سنجی راداری توسط نویسندگان تهیه شده استفاده گردید و مناطق فاقد فرونشست شناسایی شدند. سپس طی عملیات صحرایی نقاطی که فاقد هرگونه آثار فرونشست در اطراف خود بودند به‌عنوان نقاط عدم فرونشست ثبت شدند. لازم به ذکر است که بخش جنوب غربی آبخوان دشت کاشان همان منطقه تپه‌ماهوری و مخروط‌افکنه‌های اطراف شجاع‌آباد و احمدآباد (فاصله بین جاده قدیم بادرود و اتوبان اصلی) است که فرونشست در آن‌ها مشاهده نشد.



شکل ۲- نقشه پراکنش نقاط وقوع و عدم وقوع فرونشست

۲-۲-۲- تهیه نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست

مطابق با سوابق پژوهشی (مختاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ محمدی[۱] و همکاران، ۲۰۱۹؛ قربان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ عبداللهی و همکاران، ۲۰۱۹؛ رحمتی[۲] و همکاران، 2019b) و بازدیدهای میدانی به‌منظور انجام مدل‌سازی میزان فرونشست در سطح آبخوان دشت کاشان، تعداد ۱۴ عامل مؤثر بر وقوع فرونشست در چهار گروه کلی عوامل توپوگرافیک (شیب، جهت، ارتفاع از سطح دریا، انحنای طولی دامنه[۳]، انحنای عرضی دامنه[۴] و انحنای ترکیبی دامنه[۵])، عوامل زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی و فاصله از گسل)، عوامل انسانی (کاربری اراضی، فاصله از جاده، تراکم چاه‌های بهره‌برداری و فاصله از معادن) و همچنین عوامل هیدرولوژیک (تغییرات سطح ایستابی و فاصله از آبراهه) در نظر گرفته شدند.

- عوامل توپوگرافیک

به‌منظور تهیه نقشه عوامل توپوگرافیک از نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع آبخوان دشت کاشان با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر استفاده شد. این نقشه‌ها مستخرج از داده‌های سنجش‌ازدور ماهواره ALOS[۶] بوده و از پایگاه https://vertex.daacc.asf.alaska.edu دانلود شد. یکی از عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست، عامل ارتفاع از سطح دریا است. تغییرات ارتفاع موجب تغییرات بارندگی می‌شود و درنتیجه بر میزان هوازدگی و میزان نفوذ آب تأثیرگذار است (تیموری و اسدی نیلوان، ۱۳۹۸؛ رحمتی و همکاران، 2019a). این نقشه با استفاده از دستور Reclassify روی نقشه مدل رقومی ارتفاع در پنج طبقه ارتفاعی به دست آمد. عامل شیب نیز یکی از متغیرهای پستس و بلندی خیلی مهم در وقوع فرونشست زمین است (رحمتی و همکاران، 2019a). جهت شیب نیز بر میزان دریافت و نفوذ بارندگی، تبخیر و تعرق و میزان رطوبت اثرگذار است و بر همین اساس، نوع پوشش گیاهی و توزیع آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شفاپور تهرانی[۷] و همکاران، ۲۰۱۷). لایه‌های شیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی مورداشاره و به ترتیب از توابع Slope و Aspect در محیط نرم‌افزار ARC GIS 10.4 تهیه شدند. نقشه‌های انحنای عرضی، انحنای طولی و انحنای عمومی از مدل رقومی ارتفاعی دشت و با استفاده از دستورهای مربوطه در محیط Arc GIS تهیه شدند. در این مطالعه برای طبقه‌بندی نقشه‌های این عوامل از روش شکست طبیعی[۸] استفاده شد. این شاخص‌ها در حقیقت انحنای مورفولوژیک و توپوگرافیک منطقه را نشان می‌دهند (رضوی و شیرانی، ۱۳۹۷) و در شیب‌های مقعر

---

1 Mohammady
2 Rahmati
3 Profile Curvature
4 Plan Curvature
5 Curvature
6 Advanced Land Observation Satellite
7 Shafapour Tehrany
8 Natural break

باعث تجمع آب و در شیب‌های محدب باعث افزایش رواناب می‌شوند (نقیبی و همکاران[1]، ۲۰۱٤؛ تیموری و اسدی نیلوان، ۱۳۹۸). این شاخص‌ها بر روی هم‌گرایی و واگرایی جریان در شیب‌های مقعر و محدب تأثیرگذار هستند (ال–ابادی و همکاران[2]، ۲۰۱٦؛ عبداللهی و همکاران، ۲۰۱۹).

– عوامل زمین‌شناسی

نوع سنگ و سازندهای موجود در یک منطقه، عامل بسیار مهمی در وقوع فرونشست محسوب می‌شوند و واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی در وقوع فرونشست زمین هستند (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹ a؛ کیتانتزیان[3] و همکاران، ۲۰۱٤؛ زمانی‌راد[4] و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهش حاضر، لایه سنگ‌شناسی منطقه موردمطالعه از نقشه‌های زمین‌شناسی شیت‌های کاشان، آران و کهک با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که توسط سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده، استخراج گردید. وجود گسل نیز تأثیر زیادی در فرونشست زمین دارد (قربان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹b، مختاری و همکاران، ۱۳۹۸). بدین‌منظور از عامل فاصله از گسل استفاده شد. با توجه به این‌که برخی از گسل‌ها در فاصله نزدیکی خارج از منطقه مورد قرار دارند و می‌توانند تأثیر خود را در نواحی حاشیه‌ای بگذارند؛ لذا در این پژوهش، گسل‌های اطراف منطقه نیز موردبررسی و توجه قرار گرفتند. همچنین در روش‌های دو متغیره مورداستفاده در این تحقیق، محاسبات بر اساس طبقه‌بندی عوامل مؤثر انجام گردید. ازاین‌رو، این متغیر نیز به‌صورت طبقات مختلف فاصله از گسل ارائه گردید و درنهایت، نقشه فاصله از گسل با توجه به محل گسل‌های اصلی و فرعی داخل و اطراف دشت و با استفاده از دستور Multi ring buffer با فواصل ۵۰۰ متری در نرم‌افزار Arc GIS 10.4 تهیه شد.

– عوامل انسانی

ازجمله عوامل انسانی مؤثر در وقوع فرونشست، کاربری اراضی است. این عامل روی رواناب سطحی و میزان نفوذ آب اثرگذار است و از طریق مقدار نفوذ بر وقوع فرونشست تأثیر می‌گذارد. درنتیجه، پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دشت دارد (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹b). در این تحقیق برای عامل کاربری اراضی از نقشه تهیه شده برای مطالعات جامع حوضه کاشان که توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان اصفهان در سال ۱۳۹۳ تهیه شده بود، استفاده گردید. همچنین در این مطالعه، قبل از به‌کارگیری، نقشه مذکور به فرمت kml تبدیل و طی هم‌پوشانی با تصویر متناظر گوگل ارث منطقه، به‌صورت بصری از دقت و صحت نسبی آن اطمینان حاصل گردیده است.

---

1 Naghibi et al.
2 Al-Abadi
3 Kaitantzian
4 Zamanirad

فاصـله از جاده نیز یکی دیگر از شاخص‌های انسانی است که اثرات آن روی تغییرات سطح زمین می‌تواند منجر به فرونشست شود. در این مطالعه، نقشه شبکه جاده‌های داخل و خارج از دشت نیز از تصاویر Google Earth تهیه و همانند نقشـه‌های فاصله از آبراهه‌ها و گسل‌ها با استفاده از ابزار Multi ring buffer به نقشه فاصله از جاده با فواصل ۲۰۰ متری تبدیل شدند.

تعداد بیشـتر چاه نیز باعث افزایش تراکم چاه و درنتیجه برداشـت بیشتر از آبخوان، به کاهش سطح آب زیرزمینی آبخوان منجر خواهد شد (قربان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸). در این راستا، لایه تراکم چاه‌ها بر اساس چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه و با اسـتفاده از تابع Point Density برحسب تعداد در کیلومترمربع در نرم‌افزار Arc GIS 10.4 تهیه شد.

دیگر عامل انسـانی، احداث معدن اسـت که از طریق لرزش‌های ناشـی از انفجارات معدن‌کاوی، می‌تواند روی فرونشست دشت تأثیرگذار باشد و منجر به از دست رفتن مواد مغذی خاک و کاهش حاصلخیزی خاک شود (سان[1] و همکاران، ۲۰۲۳). در این تحقیق، این عامل به‌صورت لایه فاصله از معدن در نظر گرفته شده و نقشه آن با استفاده از موقعیت نقاط معادن داخل و خارج از محدوده دشـت و با اسـتفاده از دسـتور Multi ring buffer، با فواصل مساوی ۴۰۰ متری در نرم‌افزار Arc GIS 10.4 تهیه شد.

- عوامل هیدرولوژیک

تغییرات سـطح ایستابی آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرونشست است. در هنگام افت سطح آب زیرزمینی، زهکشـی آب سـبب کاهش فشـار هیدرواسـتاتیکی در لایه رس و تحکیم و فشردگی این لایه‌ها و نشست زمین می‌شـود (کیانی، ۱۳۹۶). به‌منظور تهیه نقشـه تغییرات سطح ایستابی، ابتدا آمار سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری واقع در منطقه برای یک دوره ۱۲ ساله (۹۶-۱۳۸۴) از مدیریت منابع آب کاشان اخذ و سپس در هر نقطه چاه با کسر رقوم سـطح آب در سـال ۹۶ از رقوم سـطح آب در سـال ۸۴ میزان تغییرات سطح ایستابی در هر چاه به دست آمد. درنهایت با استفاده از روش میان‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)[2]، نقشه تغییرات سطح ایستابی تهیه شد.

موقعیت آبراهه‌ها نیز به‌عنوان یک عامل هیدرولوژیک، نقش بسـیار مهمی در فرونشـسـت زمین ایفا می‌کنند (قربـان‌زاده و همکـاران، ۲۰۱۸؛ رحمتی و همکـاران، b ۲۰۱۹؛ مختاری و همکاران، ۱۳۹۸). آبراهه‌ها می‌توانند نقش تغذیه سـفره‌های آب زیرزمینی را در مواقع سیلابی ایفا نمایند، ازاین‌رو مناطق نزدیک به آبراهه می‌توانند از این مزیت برخوردار شوند. در این راستا از عامل فاصله از آبراهه استفاده شد. برای تهیه نقشه فاصله از آبراهه ابتدا لازم بود نقشه شبکه زهکشی منطقه موردمطالعه تهیه شود. بدین‌منظور از ابزار Arc Hydro استفاده و نقشه مذکور تهیه شد. در ادامه،

1 Sun
2 IDW: Inverse Distance Weighting

لایه‌های فاصـله از آبراهه بر اسـاس نقشـه آبراهه‌ها و با استفاده از دستور Multi ring buffer با فواصل ۲۰۰ متری در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شـد. لازم به ذکر اسـت که با مرور منابع و سـوابق تحقیقاتی مشـخص گردید که با توجه به وسعت و تراکم عوارض خطی در هر منطقه، فواصل در مقالات مختلف متفاوت در نظر گرفته شده است. لذا در این پژوهش چندین و چند حالت برای فواصـل در نظر گرفته شد و فواصل بافرهای عوارض خطی بر اساس یک فاصله بهینه انتخاب شـد تا طبقات با فرونشـست صفر حداقل ممکن شود. درنهایت این فواصل بر اساس واقعیت و شرایط منطقه انتخاب شدند.

۲-۳- تعیین حساسیت‌پذیری فرونشست با استفاده از مدل‌های دو متغیره

در این مرحله از پژوهش، از مجموع ۱۰۸ موقعیت فرونشست ثبت شده، به‌صورت تصادفی ۷٦ نقطه فرونشست (۷۰ درصـد) به‌عنوان داده‌های آموزش برای فرایند مدل‌سـازی و وزن‌دهی لایه‌ها انتخاب شـدند. همچنین تعداد ۳۲ نقطه فرونشسـت (۳۰ درصد) باقی‌مانده نیز برای اعتبارسنجی (آزمون) مدل‌ها در نظر گرفته شدند (شکل ۲). سپس به‌منظور وزن‌دهی به هر یک از طبقات عوامل مؤثر ۱٤ گانه، از مدل‌های دو متغیره دمپستر– شفر (تابع باور شهودی)، آنتروپی شانون، نسبت فراوانی و وزن شواهد استفاده شد که هر یک از آن‌ها در ذیل تشریح می‌شود:

۲-۳-۱- مدل دمپستر– شفر (تابع باور شهودی)

تئوری دمپستر– شفر به‌عنوان تعمیمی از تئوری بیزین است که مبتنی بر احتمالات است. این تئوری در سال ۱۹٦۷ توسط دمپستر به کار برده شد (دمپستر[1]، ۱۹٦۷؛ صابرچناری و همکاران، ۱۳۹٦) و در ادامه، ساختار ریاضی آن توسط شـفر در سـال ۱۹۷٦ تشریح گردید (شفر[2]، ۱۹۷٦). اگر فرض شود چندین عامل از داده‌های مکانی موجود در منطقه حسـاس به فرونشـسـت است، هر لایه‌ای از داده‌های مکانی به‌صورت Ei (i=1,2,….,l) برای تابع هدف T_P در نظر گرفته می‌شـود. به‌این‌ترتیب E_{ij} به‌دسـت می‌آید که در آن j ویژگی کلاس یا طبقه‌ای از E_i و دارای توزیع فراوانی از موقعیت‌ها یا ویژگی‌های مثبت و منفی در بروز فرونشـست‌هاست. نرخ مثبت با علامت $\lambda(T_P)_{E_{ij}}$ نشان داده می‌شود که از رابطه ۱ به‌دست می‌آید (پارک[3]، ۲۰۱۰):

$$\lambda(T_P)_{E_{ij}} = \frac{\frac{N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (۱)$$

نرخ یا نمره منفی نیز با علامت $\lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}}$ نیز از رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

1 Dempster
2 Shafer
3 Park

$$\lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}} = \frac{\frac{N(L)-N(L\cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(A)-N(L)-N(E_{ij})+N(L\cap E_{ij})}{N(A)-N(L)}} \qquad (۲)$$

که در آن T_P: عوامل مؤثر در ایجاد فرونشســـت، $\overline{T_P}$: عواملی اســـت که بر روی فرونشـــست تأثیری ندارند، $N(L\cap E_{ij})$: مســاحت فرونشــست در هر طبقه، $N(L)$: مساحت کل فرونشست‌های منطقه، $N(E_{ij})$: مساحت فاقد فرونشـــست در هر طبقه و $N(A)$: مساحت فاقد فرونشست منطقه مطالعاتی است. به‌طورکلی مقدار نرخ‌های به‌دست آمده از رابطه‌های ۱ و ۲ در محدوده صفر تا بی‌نهایت متغیر است. لذا با استفاده از رابطه‌های ۳، ٤ و ٥ استانداردسازی صورت می‌گیرد:

$$m(T_P)_{E_{ij}} = \frac{\lambda(T_P)_{E_{ij}}}{\sum \lambda(T_P)_{E_{ij}}} \qquad (۳)$$

$$m(\overline{T_P})_{E_{ij}} = \frac{\lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}}}{\sum \lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}}} \qquad (٤)$$

$$m(\Theta) = 1 - m(T_P)_{E_{ij}} - m(\overline{T_P})_{E_{ij}} \qquad (٥)$$

در این رابطه‌ها، $m(T_P)_{E_{ij}}$ میزان اعتقاد به وقوع فرونشـــست، $m(\overline{T_P})_{E_{ij}}$ میزان اعتقاد به عدم وقوع فرونشست و $m(\Theta)$ میزان نرخ نهایی هستند (پارک، ۲۰۱۰).

۲-۳-۲- روش آنتروپی شانون

روش آنتروپی شــانون در ســال ۱۹٤۸ توسط شانون ارائه شد. این روش به‌عنوان یکی از معروف‌ترین روش‌های تصــمیم‌گیری چند معیاره برای محاسبه وزن‌های معیارها و شاخص‌ها شناخته شده است. در این روش معمولاً به هر یک از شــاخص‌ها یک وزن نسـبت داده می‌شود، به‌طوری‌که مجموع وزن شاخص‌ها برابر ۱ باشد. در این روش هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است. شانون نشان داد که وقـایع با احتمال وقوع زیاد، اطلاعات کمتری در اختیار می‌گذارند و برعکس هرچقدر احتمال وقوع یک رخداد کمتر باشـد، اطلاعات حاصـل از آن بیشـتر است. با به‌دست آوردن اطلاعات جدید، در واقع عدم قطعیت‌ها کاهش یافته و ارزش اطلاعات جدید برابر با مقداری اســت که از عدم قطعیت کاسـته شده است. درنتیجه، عدم قطعیت و اطلاعات پارامترهایی وابسته به هم هستند. در این پژوهش به‌منظور تعیین میزان حساسیت فرونشست و ترسیم نقشه با استفاده از مدل آنتروپی شانون از رابطه‌های زیر استفاده شد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲):

$$(P_{ij}) = P_{ij} / \sum_{j=1}^{Sj} P_{ij} \qquad (٦)$$

$$H_j = -\sum_{j=1}^{Sj} (P_{ij})(\log_2 P_{ij}). \quad j = 1 \dots n \qquad (۷)$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j \quad (۸)$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}} \quad I = (0.1) . \quad j = 1.2 \dots n \quad (۹)$$

$$W_J = I_j P_{ij} \quad (۱۰)$$

که در آن، P_{ij} تراکم یا نسبت فراوانی (FR) فرونشست در هر طبقه است که در رابطه ۱۰ نحوه محاسبه آن توضیح داده می‌شود. P_{ij} احتمال وجود فرونشست در هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن، H_j و H_{max} مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات، S_j تعداد طبقه‌ها و W_j وزن نهایی هر عامل است. بعد از تعیین وزن نهایی هر عامل و ضرب آن در کلاس‌های عامل مذکور، یعنی مقدارهای P_{ij} مربوط به هر عامل و کلاس‌های آن بر اساس تقسیم تعداد فرونشست بر تعداد فرونشست بر تعداد پیکس‌های کلاس‌های عوامل، نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی پتانسیل فرونشست تهیه شد (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹٤).

۲-۳-۳- روش نسبت فراوانی (FR)

نسبت فراوانی یک روش آماری دو متغیره است که برای محاسبه رابطه احتمالی بین متغیرهای مستقل و وابسته در نقشه‌های با کلاس‌های متعدد استفاده می‌شود و می‌تواند روابط بین فرونشست‌ها و عوامل مختلف مؤثر در منطقه موردمطالعه را آشکار نماید (ازدمیر و آلتورال[1]، ۲۰۱۳). در این پژوهش برای محاسبه نسبت فراوانی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست، درصد پیکسل‌های دارای فرونشست و فاقد فرونشست منطقه موردمطالعه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی تعیین گردید. سپس نسبت فراوانی برای هر یک از عوامل و کلاس مرتبط با آن محاسبه گردید (لی[2]، ۲۰۰۷؛ محبی تفرشی و همکاران، ۱۳۹۹). محاسبه نسبت فراوانی برای هر یک از کلاس‌های عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست بر اساس رابطه (۱۱) است:

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \quad (۱۱)$$

که در این رابطه، A: پهنه‌های فرونشست هر کلاس مربوط به هر عامل، B: مساحت کل فرونشست‌ها در منطقه مطالعاتی، C: مساحت هر کلاس مربوط به هر عامل و D: مساحت کل منطقه موردمطالعه است. به‌عبارت‌دیگر، نسبت بین پهنه‌های دارای فرونشست به مساحت کل منطقه، بیانگر نسبت فراوانی است. ازاین‌رو $Fr < 1$ نشان‌دهنده همبستگی ضعیف بین فرونشست‌های رخداده و عوامل مؤثر بر وقوع آن و $Fr > 1$ نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین فرونشست‌های رخداده و عوامل مؤثر بر وقوع آن است. Fr نزدیک به یک نشان می‌دهد که همبستگی معنی‌داری

1 Ozdemir & Altural
2 Lee

بین فرونشـــست‌های رخداده و عوامل مؤثر بر وقوع آن وجود ندارد. به‌طورکلی، همبستگی مثبت نشان‌دهنده احتمال فرونشست بالاتر و همبستگی منفی نشان‌دهنده احتمال فرونشست پایین‌تر است (صابرچناری، ۱۳۹٦؛ پرادهان و لی[1]، ۲۰۱۰).

۲-۳-٤- مدل وزنی شاهد (وزن شواهد)

این روش برای مدل‌سـازی در یک منطقه برای هر عامل در صـورت وجود یا عدم وجود فرونشـست در محل، وزنی را محـاسـبـه می‌کنـد. تعیین وزن برای هر عامل از طریق ترکیب هرکدام از لایه‌های عاملی با نقشـه پراکنش فرونشـسـت انجام می‌شـود. در این مدل، مقادیر وزنی معمولاً دامنه‌ای بین اعداد مثبت و منفی دارند که بیان‌گر نقش بیشـتر و کمتر متغیر در ایجاد فرونشـسـت است. روش وزن‌دهی شواهد بر تئوری بیزین در احتمالات شرطی استوار اسـت (توییدِ[2] و همکاران، ۲۰۰۷؛ علیخانی و همکاران، ۱٤۰۰). وزن‌ها در این روش بر اسـاس وجود یا عدم وجود فرونشست در منطقه موردمطالعه به‌صورت رابطه‌های زیر محاسبه شدند:

$$W^{+} = \ln\left(\frac{P\left(\frac{F}{S}\right)}{P\left(\frac{F}{S^{*}}\right)}\right) \quad (۱۱)$$

$$W^{-} = \ln\left(\frac{P\left(\frac{F^{*}}{S}\right)}{P\left(\frac{F^{*}}{S^{*}}\right)}\right) \quad (۱۲)$$

$$C = W^{+} - W^{-} \quad (۱۳)$$

که در آن P احتمال، F حضـور یک فاکتور، *F عدم حضور یک فاکتور، S حضور فرونشست و *S عدم حضور فرونشست است. W^{+} و W^{-} به ترتیب بیان‌گر وزن شواهد وقتی یک فاکتور (مثلاً زمین‌شناسی)، حضور و عدم حضور داشـته باشد. مقدار C در واقع کنتراست بین اوزان است. مقدار صفر آن بیان‌گر عدم وجود رابطه بین فاکتور مستقل با فاکتور وابسـته (فرونشـسـت) است. مقدار مثبت و بزرگ‌تر، نشان‌دهنده همبستگی مثبت و بیشتر بین فاکتور مربوطه با ظهور یا وقوع فرونشـسـت است. در روش وزن‌دهی شواهد، بعد از محاسبه مقدار W^{+} در تمام طبقات فاکتورها، ابتدا مقدار مجموع وزن‌های مثبت برای هر سلول روی نقشه به‌دست آمده و سپس احتمال نهایی محاسبه شد که مقدار آن بین صـفر تا ۱ اسـت. درنهایت با اسـتفاده از نرم‌افزار ArcGIS مدل به کار گرفته و نقشه میزان حساسیت فرونشست استخراج شد (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۵).

1 Pradhan & Lee
2 Tweed

۳- ارزیابی کارایی مدل‌های مورد استفاده

ارزیابی دقت مدل‌ها در دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی بر اساس روش منحنی مشخصه عامل گیرنده (ROC) انجام شد. منحنی ROC به‌صورت نموداری ارائه می‌شود که در آن احتمال تشخیص صحیح نقاط حضور مدل با احتمال تشخیص صحیح نقاط عدم حضور مقایسه می‌شود (فیلیپس[1] و همکاران، ۲۰۰۶؛ الیت[2] و همکاران، ۲۰۱۱). سطح زیر نمودار (AUC) به‌دست آمده به‌عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور از عدم حضور موردتوجه قرار می‌گیرد. سطح زیر نمودار (AUC) مدلی با قدرت پیشگویی بسیار کم، ۰/۵ است و مدلی کامل با قدرت پیشگویی بسیار زیاد، دارای AUC به میزان یک خواهد بود (فرامرزی و همکاران، ۱۳۹۹).

٤- نتایج

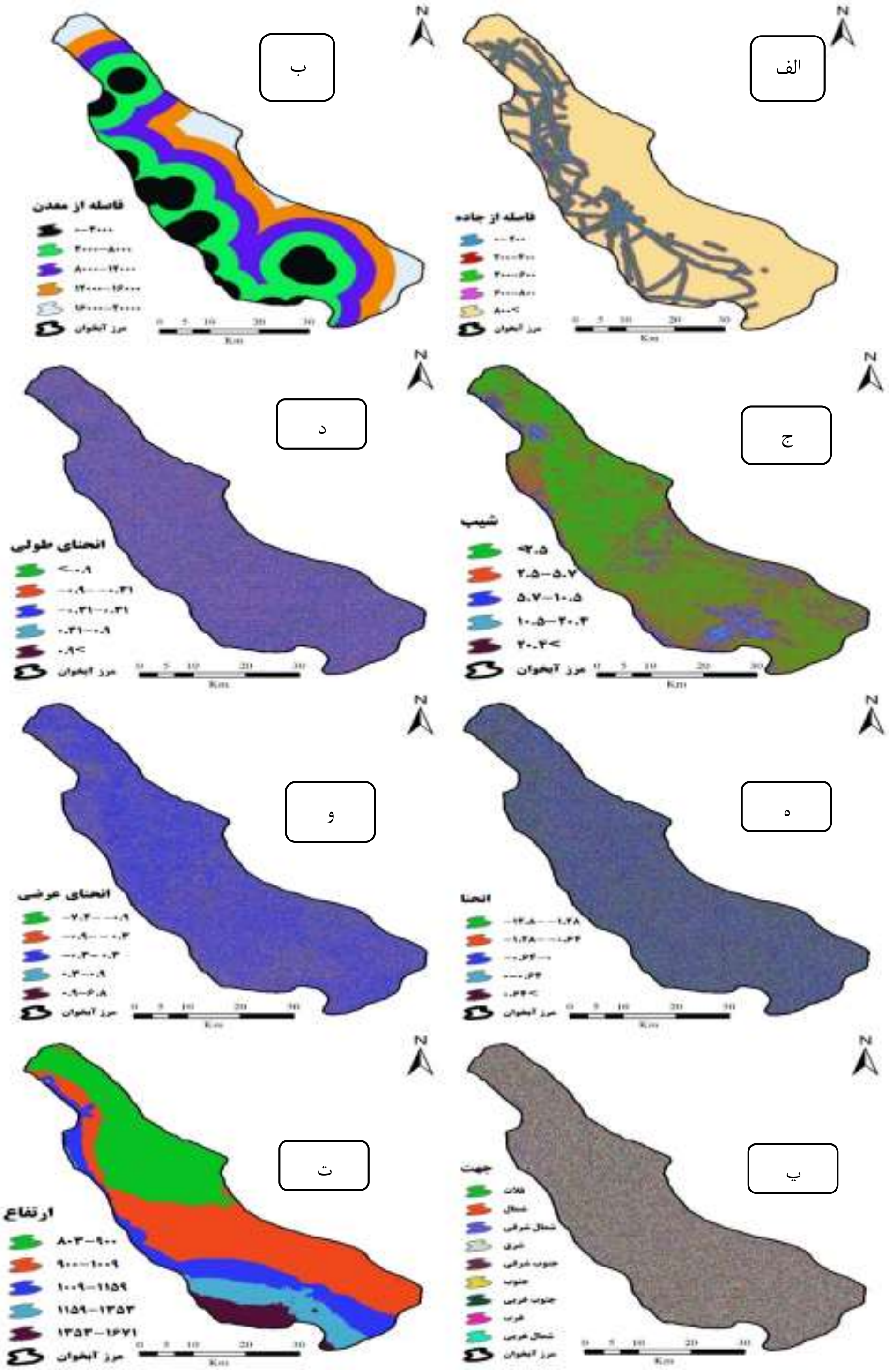
٤-۱- عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست

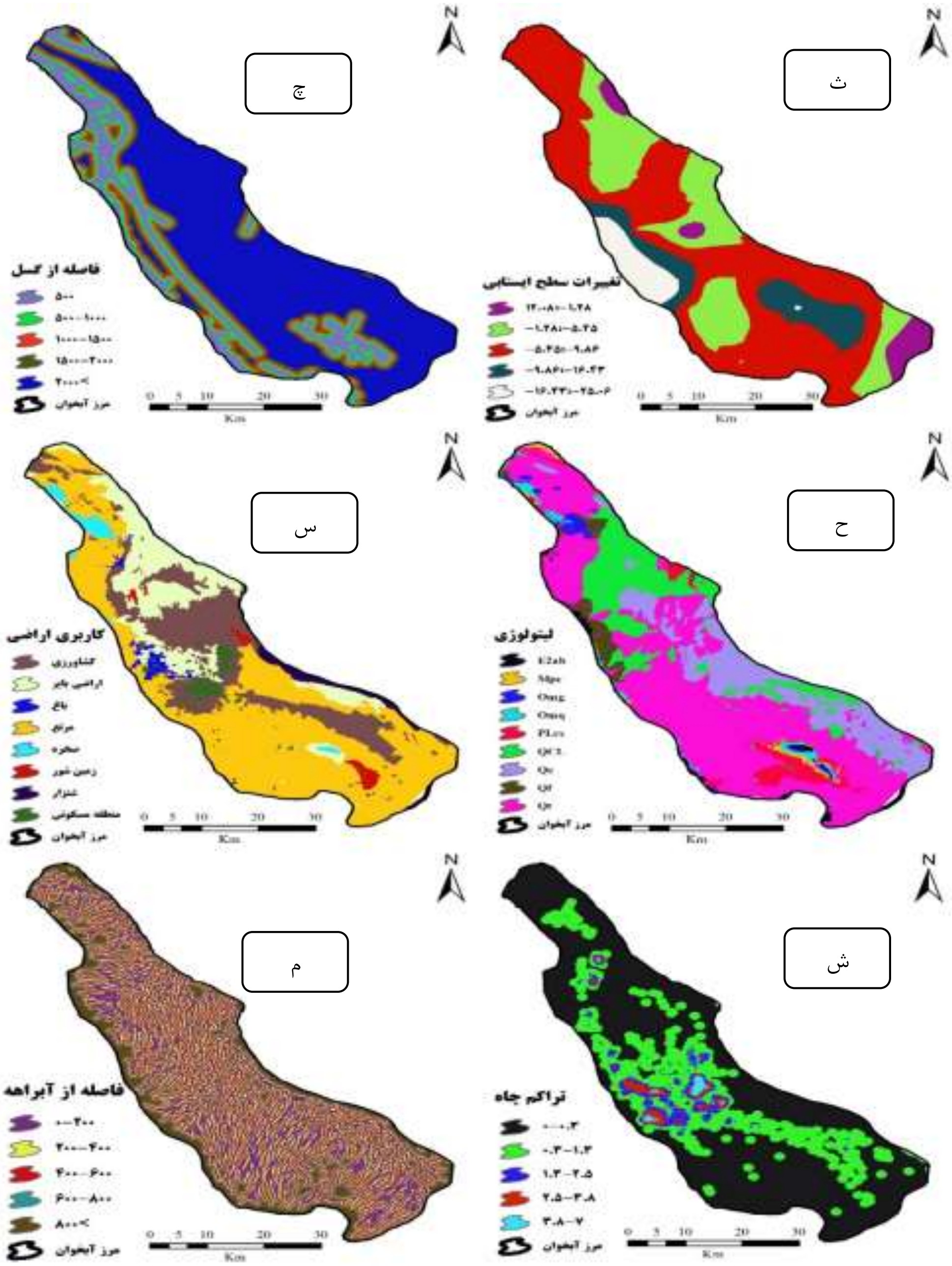
نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست زمین آبخوان دشت کاشان در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. نقشه عامل فاصله از جاده نشان می‌دهد که تغییرات فاصله از جاده بین ۲۰۰ تا بیشتر از ۸۰۰ متر است و جاده‌ها در قسمت‌های شمال غربی، غرب و جنوب غربی آبخوان پراکنش بیشتری دارند (شکل ۳-الف). فاصله از معدن نیز بین ٤ تا ۲۰ کیلومتر متغیر است. معادن نیز بیشتر در قسمت‌های شمال غربی، غرب و جنوب غربی آبخوان و نزدیک به جاده‌ها پراکنش دارند (شکل ۳-ب). میزان شیب در سطح دشت کمتر از ۲۱ درصد است و پراکندگی طبقات شیب در کل سطح آبخوان مشهود است. همچنین کمی بیش از ۸٦ درصد آبخوان دشت کاشان، شیب کمتر از ٦ درصد دارد (شکل ۳-ج). میزان دامنه تغییرات انحنای طولی بین ۰/۹- الی ۰/۹، انحنای عرضی بین ۷/٤- الی ٦/۸ و انحنای سطح نیز بین ۱۲/۸- الی ۰/٦٤ است و تغییرات نسبی این شاخص‌ها در کل سطح پراکنده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، بیشتر سطح دشت در دامنه میانی قرار گرفته و درنتیجه، مسطح و بدون انحنا است (شکل‌های ۳-د، ۳-و، ۳-ه). دامنه تغییرات ارتفاع در منطقه مطالعاتی بین ۸۰۳ الی ۱٦۷۱ متر است و از شمال و شمال غربی منطقه مطالعاتی به سمت جنوب و جنوب غربی ارتفاع از سطح دریا در حال افزایش است. همچنین حدود ۷۰ درصد از وسعت آبخوان دشت کاشان در دامنه ارتفاعی ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متری قرار دارد (شکل ۳-ت۳). همچنین دامنه تغییرات سطح ایستابی در یک دوره ۱۲ ساله بین ۱۲/۰۸ تا ۲۵/۰٦- متر است و تغییرات مذکور در جنوب غرب منطقه مطالعاتی بیشتر از سایر مناطق است. بیشترین تغییرات یعنی ۲۵/۰٦- متر نیز در منطقه خزاق است (شکل ۳-ث). فاصله از گسل‌های منطقه از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر متغیر است و پراکندگی گسل‌ها در شمال غربی، غرب، جنوب غربی و قسمتی از جنوب دشت بیشتر است (شکل ۳-چ). تنوع کاربری اراضی و سنگ‌شناسی نیز در منطقه مطالعاتی بالا است، به‌طوری‌که منطقه

---

1 Phillips
2 Elith

مطالعاتی دارای ۸ نوع کاربری و ۹ نوع لیتولوژی اسـت.کاربری‌های مرتع، کشـاورزی و اراضـی بایر، دارای بیشترین سـطح کاربری‌ها هسـتند و در میان آن‌ها نیز، کاربری مرتع بیشـترین وسعت منطقه را به میزان ۵۱/۷۲ درصد به خود اختصـاص داده است. واحد Qt1 (تراس‌های قدیمی) در بخش لیتولوژی نیز دارای بیشترین وسعت (۵۳/۳۹ درصد) در منطقه مطالعاتی است. سایر یافته‌ها نیز نشان داد که حدود ۸۸ درصد منطقه مطالعاتی متشکل از تراس‌های قدیمی، ورق شـن و ماسـه و فلات رسی است (شکل‌های ۳–ح و ۳–س). تراکم چاه‌های بهره‌برداری نیز بین ۰/۳ تا ۷ تعداد در کیلومترمربع متغیر اسـت و پراکندگی چاه‌ها در مرکز و جنوب شرقی دشت بیشتر از سایر مناطق است (شکل ۳–ش). فاصـله از آبراهه‌ها بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ متر متغیر است و الگوی شبکه آبراهه‌ها در منطقه مطالعاتی به‌صورت شاخه درختی است و دامنه تغییرات پایین نشان از تعدد آبراهه‌ها در سطح دشت است (شکل ۳–م).


الف
فاصله از جاده
مرز آبخوان
ب
فاصله از معدن
۰-۴۰۰۰
۴۰۰۰-۸۰۰۰
۸۰۰۰-۱۲۰۰۰
۱۲۰۰۰-۱۶۰۰۰
۱۶۰۰۰-۲۰۰۰۰
مرز آبخوان
ج
شیب
۲.۵>
۲.۵-۵.۷
۵.۷-۱۰.۵
۱۰.۵-۲۰.۴
۲۰.۴<
مرز آبخوان
د
انحنای طولی
مرز آبخوان
ه
انحنا
مرز آبخوان
و
انحنای عرضی
مرز آبخوان
پ
جهت
فلات
شمال
شمال شرقی
شرقی
جنوب شرقی
جنوب
جنوب غربی
غرب
شمال غربی
مرز آبخوان
ت
ارتفاع
۸۰۳-۹۰۰
۹۰۰-۱۰۰۹
۱۰۰۹-۱۱۵۹
۱۱۵۹-۱۳۵۳
۱۳۵۳-۱۶۷۱
مرز آبخوان
Km



شکل ۳- عوامل مورداستفاده در تعیین مناطق دارای فرونشست

٤-۲- وزن‌دهی طبقات عوامل مؤثر با استفاده از مدل‌های دو متغیره

جدول ۱، وزن‌های نهایی محاسبه شده طبقات عوامل مؤثر بر فرونشست زمین بر اساس مدل‌های مورداستفاده در منطقه مطالعاتی را نشـــان می‌دهد. در این جدول همچنین مســـاحت هر طبقه برحســـب هکتار و تعداد نقاط دارای فرونشـــست به تفکیک هر عامل نشـان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده بیشترین تعداد نقاط فرونشست

مشـاهداتی مورداسـتفاده در مرحله آموزش، در جهات جغرافیایی جنوب و شمال غربی، فاصله بیشتر از ۲۰۰۰ متری گسـل‌ها، شـیب‌های کمتر از ۱۰/۵ درصد و همچنین ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متری از سطح دریا واقع شده‌اند. همچنین کلیه فرونشـسـت‌های ثبت شـده در کاربری‌های اراضـی بایر، اراضـی کشـاورزی، مرتع و تنها یک مورد در منطقه مسـکونی مشاهده شده است. بر اساس نتایج انحنای عرضی، انحنای طولی و انحنای ترکیبی، بیشترین میزان پراکنش فرونشـسـت‌ها در مناطق مقعر دشـت مشاهده شده است. تغییرات سطح ایستابی نیز نشان می‌دهد که در کلیه طبقات تغییر سطح ایستابی، فرونشست مشاهده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، فرونشست‌ها بیشتر در مناطق دارای تراکم چاه کمتر رخ داده اسـت. همچنین کلیه فرونشـست‌های ثبت شده در واحدهای سنگ‌شناسی QCL، Qe و Qt مشـاهده شـده اسـت. سایر نتایج این قسمت نشان داد که در فاصله ۰-۲۰۰ و ۲۰۰-٤۰۰ متری از آبراهه‌ها   و نیز در فاصـله بیشتر از ۸۰۰ متری از جاده‌ها بیشترین فرونشست اتفاق افتاده است. همچنین در کلیه طبقات فاصله از معادن فرونشست رخ داده است.

جدول ۱- وزن‌های نهایی روش‌های دمپستر- شفر، وزن‌دهی شواهد، آنتروپی شانون و نسبت فراوانی

عامل	طبقات	مساحت هر طبقه (هکتار)	تعداد نقاط فرونشست	دمپستر- شفر m(Θ)	آنتروپی شانون Wij	وزن شواهد C	نسبت فراوانی FR
جهت	مسطح (فلات)	۲٦۱۵/۳٤	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۱٤	۰/۰۰
	شمال	۲۷٤٤۳/۷۷	۸	۰/۷۸	۰/۰۷	۰/۲۰	۰/۸٦
	شمال شرقی	۲۷۱٤۱/۱٤	۸	۰/۷۸	۰/۰۷	۰/۱۹	۰/۸۷
	شرق	۲۸٤۹۹/٦۷	۳	۰/۸٤	۰/۰۳	۱/٤٦	۰/۳۱
	جنوب شرقی	۲۷۳٦۳/٤۲	۱۰	۰/۷٦	۰/۰۹	-۰/۰۹	۱/۰۷
	جنوب	۲۷٤۲۳/۱۳	۱٤	۰/۷۱	۰/۱۳	-۰/۵۵	۱/۵۰
	جنوب غربی	۲۷۰۷۰/۱۱	۱۱	۰/۷۵	۰/۱۰	-۰/۲٤	۱/۱۹
	غرب	۲۸۳۷۵/۲٤	۹	۰/۷۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۹۳
	شمال غربی	۲۷۲۹۵/٦۷	۱۳	۰/۷۲	۰/۱۲	-۰/٤۵	۱/٤۰
فاصله از گسل (متر)	۵۰۰	۳۲۷۹۲/٤۸	٦	۰/٦۲	۱/۰۲	۰/۰۹۵	۰/۵٤
	۵۰۰- ۱۰۰۰	۲۲۷۲۳/۷۹	٤	-۰/۲۸	۰/۹۸	۰/۰۹۷	۰/۵۲
	۱۰۰۰- ۱۵۰۰	۱۸۵۲۰/٦۸	۱	-۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲٦	۰/۱٦
	۱۵۰۰- ۲۰۰۰	۱۵۹۵۰/۸۷	٦	-۰/۲۰	۲/۱۰	-۰/۰۱۵	۱/۱۰
	>۲۰۰۰	۱۳۳۲۳۹/٦۸	۵۹	۰/۳۳	۲/۱۰	-۰/۱۱٦	۱/۳۰
شیب (درصد)	<۲/۵	۱۱۱۳٦۱/۲۷	٤۵	۰/٤۵	۱/۹۹	-۱/۵۷	۱/۱۹
	۲/۵-۵/۷	۸۱۳۰۹/۰۵	۲۲	۰/۵۲	۱/۳۳	۱/٤۲	۰/۷۹
	۵/۷-۱۰/۵	۲۳۵۳۰/۰۸	۹	۰/٤٤	۱/۸۸	-۰/۵۵	۱/۱۲

عامل	طبقات	مساحت هر طبقه (هکتار)	تعداد نقاط فرونشست	دمپستر– شفر m(Θ)	آنتروپی شانون Wij	وزن شواهد C	نسبت فراوانی FR
	۱۰/۵–۲۰/٤	٦۰۷٤/۲۷	۰	۰/۷۹	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۰۰
	>۲۰/٤	۹۵۲/۸۳	۰	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰
ارتفاع (متر)	۸۰۳– ۹۰۰	٦٥٦٤۱/۳	٤۷	۰/۲۰	٥/٦۹	–۱/٥٦	۲/۱۰
	۹۰۰– ۱۰۰۹	۸۹۱٦۰/۷	۲۹	۰/٤۸	۲/٥۹	۰/۰۹	۰/۹٦
	۱۰۰۹– ۱۱٥۹	۳٤۸٥۰/۳	۰	۰/۷٦	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۰۰
	۱۱٥۹– ۱۳٥۳	۲۲۰۸٦/۲	۰	۰/۷۷	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۰۰
	۱۳٥۳– ۱٦۷۱	۱۱٤۸۹	۰	۰/۷۹	۰/۰۰	۰/۰٦	۰/۰۰
کاربری اراضی	کشاورزی	٤۹۷۹۳/٤۱	۱۸	۰/٦۹	۱/٥۹	–۰/۱۷	۱/۰٦
	اراضی فاقد پوشش	۳۸۹۱٤/٤٤	٤۷	۰/۲۹	٥/۳۳	–۰/۱٦	۳/٥٤
	باغ	۳۲۸٥/۳۰	۰	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰
	مرتع	۱۱٥٤٥۱/۱۲	۱۰	۰/۷٤	۰/۳۸	۰/۱۳	۰/۲٦
	صخره	٤۲۰۳/۷۳	۰	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۰۰٤	۰/۰۰
	زمین‌های شور	۳۱۲٥/۳۸	۰	۰/۸۸	۰/۰۰	–۰/۰۲	۰/۰۰
	ماسه‌زار (شن‌زار)	۳۳۱٦/٥۰	۰	۰/۸۸	۰/۰۰	–۰/۱۰	۰/۰۰
	منطقه مسکونی	٥۱۳۷/٦۱	۱	۰/۷۷	۷/۳۱	۰/۰۰۲	۰/٥۷
انحنای عرضی	۷/٤– الی ۰/۹–	٤۱٥٥/۷۸	۲۲	۰/۰۳	۲۰/٦٦	–۰/۲۷	۱٥/٥٥
	۰/۹– الی ۰/۳–	٤۳۰٦۲/۸۰	۳۷	۰/۷٥	۳/۳٥	–۰/۸۱	۲/٥۲
	۰/۳– الی ۰/۳	۱۲۸٤۸۰/۱۳	۱٥	۰/٦٤	۰/٤٦	۰/۷٤	۰/۳٤
	۰/۳ الی ۰/۹	٤۳۱۸۹/۲۷	۲	۰/۷۷	۰/۱۸	۱/۰٦	۰/۱٤
	۰/۹ الی ٦/۸	٤۳۳۹/٥۲	۰	۰/۸۱	۰/۰۰	–۰/۰٤	۰/۰۰
انحنای طولی	<–۰/۰۹	۳٤۹٤/٤۷	۲۰	–۰/۰۳	۲۱/٥٦	۱/٦٥	۱٦/۸۱
	۰/۰۹– الی ۰/۳۱–	٦۲۰۰۲/۸۰	۳۳	۰/۷۷	۲/۰۱	۰/٥٤	۱/٥٦
	۰/۳۱– الی ۰/۳۱	۹۱٦٥۷/٤۷	۲۲	۰/۷۳	۰/۹۰	–۰/۰۰٤	۰/۷۰
	۰/۳۱ –۰/۹	٦۲٥۱٤/۰٦	۱	۰/۷۳	۰/۰٦	–۱/٦۰	۰/۰٥
	>۰/۹	۳٥٥۸/۷۰	۰	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
انحنای کلی دامنه	۱۲/۸– الی ۱/۲۸–	۳٥٥۰۲/۱٦	۱٥	۰/٥٦	۲/٤٦	–۰/۷۱	۱/۲٤
	۱/۲۸– الی ۰/٦٤–	٤۱٦۰۲/۰۸	۱٥	۰/٥۹	۲/۱۰	–۰/۱۹	۱/۰٦
	۰/٦٤– الی ۰	٦۹۱۰۲/۸۰	۲۳	۰/٦۱	۱/۹٤	۰/۰۹	۰/۹۸
	۰– ۰/٦٤	٤۱٦٤۹/۳۸	۹	۰/٦٦	۱/۲٦	۱/٤٦	۰/٦٤
	>۰/٦٤	۳٥۳۷۱/۰۸	۱٤	۰/٥۸	۲/۳۱	–۰/٤۹	۱/۱٦
تغییرات سطح ایستابی (متر)	۱۲/۰۸ الی ۱/۲۸–	۱۰۰۱٥/۲۷	۳	۰/٤٦	۱/٦۷	۰/۰٥	۰/۸۸
	۱/۲۸– الی ٥/٤٥–	٥۸٤۸۱/۰۲	۳٥	۰/۸۰	۳/۳۳	–۰/۳۰	۱/۷٦

عامل	طبقات	مساحت هر طبقه (هکتار)	تعداد نقاط فرونشست	دمپستر-شفر m(Θ)	آنتروپی شانون Wij	وزن شواهد C	نسبت فراوانی FR
	۵/۴۵- الی ۹/۸۶-	۱۱۷۴۷۴/۹۱	۳۲	۰/۷۵	۱/۵۲	۰/۱۴	۰/۸۰
	۹/۸۶- الی ۱۶/۴۳-	۲۵۰۵۸/۴۱	۵	۰/۷۹	۱/۱۱	۰/۲۰	۰/۵۹
	۱۶/۴۳- الی ۲۵/۰۶-	۱۲۱۹۷/۸۹	۱	۰/۱۹	۰/۴۶	۰/۵۰	۰/۲۴
تراکم چاه (تعداد در کیلومترمربع)	۰– ۰/۳	۱۴۴۳۴۸/۸۷	۴۴	۰/۵۴	۱/۶۵	۱/۰۹	۰/۸۹
	۰/۳– ۱/۳	۶۴۸۱۹/۴۰	۲۸	۰/۵۰	۲/۳۸	۱/۳۴-	۱/۲۹
	۱/۳– ۲/۵	۸۸۵۹/۳۰	۳	۰/۵۵	۱/۸۴	۰/۰۳	۰/۹۹
	۲/۵– ۳/۸	۳۸۰۱/۴۳	۱	۰/۶۱	۱/۴۳	۰/۹۵	۰/۷۷
	۳/۸– ۷	۱۳۹۸/۵۰	۰	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰
لیتولوژی (سنگ‌شناسی)	E2ab	۱۸۱۳/۰۴	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰
	Mpc	۲۲۵۰/۶۸	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰
	Omg	۳۲۰۶/۴۰	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰
	Omq	۳۶۷۲/۹۷	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰
	PLcs	۹۳۶۶/۵۳	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۱۶	۰/۰۰
	QCL	۳۶۸۹۰/۹۸	۴۴	۰/۲۹	۴/۷۶	۰/۷۱-	۳/۵۰
	Qe	۴۰۲۳۰/۰۹	۲۱	۰/۶۲	۲/۰۸	۰/۲۰-	۱/۵۳
	Qf	۶۶۰۹/۱۲	۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰
	Qt	۱۱۹۱۸۷/۶۹	۱۱	۰/۷۵	۰/۳۷	۰/۷۰	۰/۲۷
فاصله از آبراهه (متر)	۰– ۲۰۰	۹۱۵۱۹/۱۲	۳۳	۰/۵۱	۱/۹۶	۰/۱۷-	۱/۰۶
	۲۰۰– ۴۰۰	۶۲۷۵۲/۴۰	۲۴	۰/۵۶	۲/۰۸	۰/۲۸-	۱/۱۲
	۴۰۰– ۶۰۰	۳۳۸۷۰/۴۲	۱۵	۰/۵۰	۲/۴۱	۰/۵۴-	۱/۳۰
	۶۰۰– ۸۰۰	۱۵۹۳۶/۷۷	۴	۰/۶۳	۱/۳۶	۰/۵۵	۰/۷۴
	>۸۰۰	۱۹۱۴۸/۸۰	۰	۰/۸۰	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰
فاصله از جاده (متر)	۰– ۲۰۰	۲۴۴۳۱/۴۷	۹	۰/۶۳	۲/۱۲	۰/۱۲-	۱/۰۸
	۲۰۰– ۴۰۰	۲۰۳۵۸/۰۶	۱۲	۰/۵۳	۳/۳۹	۰/۸۱-	۱/۷۳
	۴۰۰– ۶۰۰	۱۶۰۷۶/۷۷	۹	۰/۵۴	۳/۲۲	۰/۷۱-	۱/۶۴
	۶۰۰– ۸۰۰	۱۳۲۰۰/۰۵	۳	۰/۶۹	۱/۳۱	۰/۵۵	۰/۶۷
	>۸۰۰	۱۴۹۱۶۱/۱۴	۴۳	۰/۶۱	۱/۶۶	۰/۵۶	۰/۸۵
فاصله از معدن (متر)	۰– ۴۰۰۰	۴۱۰۱۸/۷۰	۳	۰/۶۴	۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۲۱
	۴۰۰۰– ۸۰۰۰	۶۸۰۱۶/۷۶	۴۳	۰/۱۸	۳/۴۵	۰/۱۰-	۱/۸۶
	۸۰۰۰– ۱۲۰۰۰	۵۴۴۵۷/۰۵	۱۲	۰/۷۴	۱/۲۰	۰/۰۵	۰/۶۵
	۱۲۰۰۰– ۱۶۰۰۰	۳۹۱۸۸/۰۹	۷	۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۰۷	۰/۵۲
	۱۶۰۰۰– ۲۰۰۰۰	۲۰۵۴۶/۹۰	۱۱	۰/۶۷	۲/۹۲	۰/۰۵	۱/۵۷

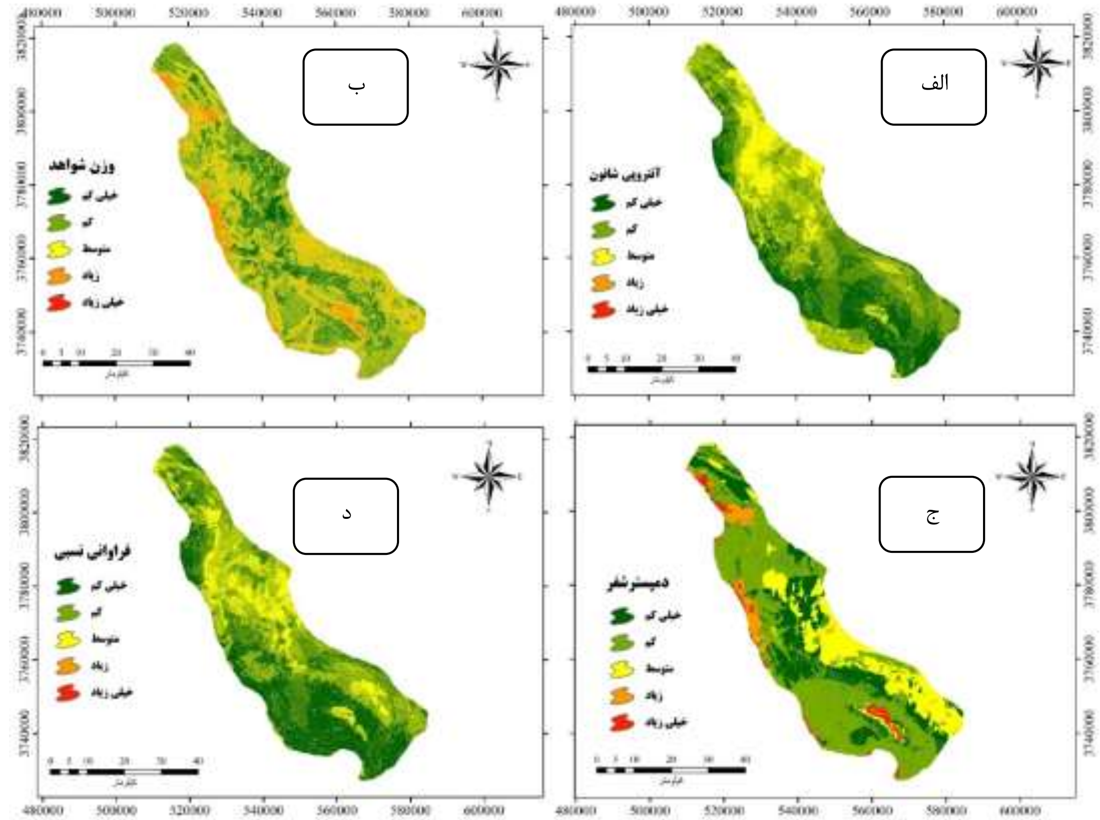
۴-۳- نقشه‌های حساسیت فرونشست حاصل از مدل‌های مختلف

نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست منطقه مطالعاتی بر اساس مدل‌های فوق‌الذکر در شکل ۴ نشان داده شده است. در روش آنتروپی شانون، کلاس با حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در مناطق شمال و شمال شرق دشت متمرکز هستند (شکل ۴-الف). بر اساس نقشه حاصل از روش وزن شواهد، کلاس‌های حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد بیشتر در شمال غربی، غرب و جنوب شرقی دشت متمرکز هستند (شکل ۴-ب). همچنین نقشه حساسیت‌پذیری روش دمپستر- شفر نشان داد که بخش بسیار کمی از وسعت منطقه مطالعاتی دارای کلاس حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در شمال غربی، غرب و بخشی از جنوب و جنوب شرق دشت است (شکل ۴-). بر اساس روش نسبت فراوانی، کلاس‌های با حساسیت‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در شمال شرقی و شرق منطقه مطالعاتی متمرکز هستند (شکل ۴-د).

جدول ۲ نیز مساحت (هکتار) و درصد هر یک از طبقات نقشه حساسیت‌پذیری فرونشست (بر اساس مرز نهایی در نظر گرفته شده) را به تفکیک چهار روش مورداستفاده نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، طبقه با خطر خیلی زیاد در همه روش‌ها کمترین میزان مساحت را به خود اختصاص داده است و دوطبقه خطر کم و متوسط بیشترین میزان مساحت را دارند.

جدول ۲- مساحت و درصد هرکدام از طبقات نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرونشست با استفاده از مدل‌های مورد

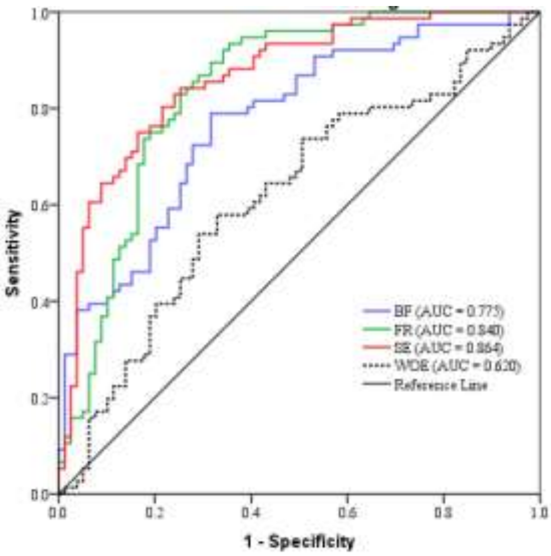
روش	خیلی کم		کم		متوسط		زیاد		خیلی زیاد	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
وزن شواهد	۲۵۵۸۸/۶	۱۱/۵۴	۶۲۰۶۵/۶	۲۷/۹۹	۷۰۹۴۸/۷	۳۱/۹۹	۴۷۷۶۲/۲	۲۱/۵۴	۱۵۳۹۸/۳	۶/۹۴
آنتروپی شانون	۴۷۸۶۳/۷	۲۱/۶	۷۲۹۶۱/۵	۳۲/۹	۶۴۶۸۱/۲	۲۹/۲	۳۰۱۵۲/۳	۱۳/۶	۶۱۰۴/۷	۲/۸
دمپستر-شفر	۵۳۰۵۳/۵	۲۳/۹	۱۱۱۲۳۶/۹	۵۰/۲	۴۲۲۶۸/۱	۱۹/۱	۹۴۶۷/۱	۴/۳	۵۷۳۷/۸	۲/۶
فراوانی نسبی	۶۰۴۸۲/۳	۲۷/۳	۶۴۳۴۰/۵	۲۹	۶۱۰۰۳/۴	۲۷/۵	۲۹۴۲۴/۹	۱۳/۳	۶۵۱۲/۳	۲/۹



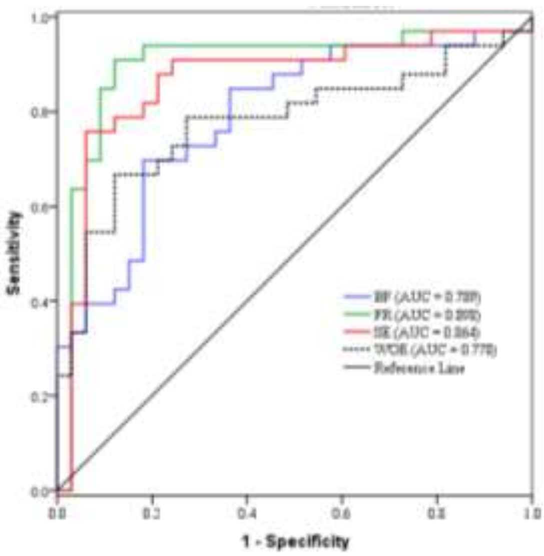
شکل ٤- نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرونشست زمین در سطح دشت کاشان

٤-٤- ارزیابی مدل‌ها

در این مطالعه، ارزیابی نقشه‌های حاصل از مدل‌های مختلف با استفاده از روش منحنی ROC برای مجموعه داده‌های مشاهداتی در دو مرحله مدل‌سازی و اعتبارسنجی انجام شد. شکل‌های ٥ و ٦، منحنی‌های ROC و مقادیر شاخص AUC را برای مدل‌های مورداستفاده در بخش آموزش و اعتبارسنجی مدل نشان می‌دهد. بر اساس شکل ٥ در مرحله آموزش، مدل آنتروپی شانون با میزان AUC برابر با ۰/٨٦٤ بهترین عملکرد و مدل وزن‌دهی شواهد با مقدار AUC برابر با ۰/٦٢۰ پایین‌ترین کارایی را نسبت به سایر روش‌ها داشته‌اند. دو مدل نسبت فراوانی و تابع باور شهودی (دمپستر- شفر) به‌ترتیب با مقادیر AUC برابر با ۰/٨٤۰ و ۰/٧٧٥ در اولویت‌های دوم و سوم قرار داشتند. نتایج حاصل از ارزیابی نقشه‌های حاصل از مدل‌ها بر اساس داده‌های اعتبارسنجی در شکل ٦ نیز حاکی از آن بود که روش نسبت فراوانی با مقدار AUC برابر با ۰/٨٩٨ دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. پس‌ازآن، مدل‌های آنتروپی شانون (AUC =۰/٨٦٤)، تابع باور شهودی (AUC =۰/٧٨٩) و وزن‌دهی شواهد (AUC =۰/٧٧٨) در رده‌های بعدی از نظر کارایی قرار گرفتند.



شکل ۵- مقادیر AUC در بخش آموزش مدل‌های مورداستفاده



شکل ٦- مقادیر AUC در بخش اعتبارسنجی مدل‌های مورداستفاده

۵- بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست می تواند در اثر پدیده‌های طبیعی مانند انحلال، تراکم نهشته‌ها و حرکات آرام پوسته و یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدنکاری و برداشت آب‌های زیرزمینی ایجاد شود. در دهه‌های اخیر، فرونشست زمین همراه با صنعتی شدن، شهرنشینی و پمپاژ بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی مشاهده شده است. در هنگام افت سطح آب زیرزمینی، زهکشی آب سبب کاهش فشار هیدرواستاتیکی در لایه رس و تحکیم و فشردگی این لایه‌ها و نشست زمین می شود. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان فرونشست‌ها در جهات جغرافیایی جنوب و شمال غربی واقع شده‌اند. در سایر جهات جغرافیایی نیز فرونشست در سطح منطقه مطالعاتی مشاهده شده است که اهمیت پایین جهت را در حساسیت فرونشست نشان می‌دهد. مختاری و همکاران (۱۳۹۸) و محمدی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به اهمیت پایین جهت جغرافیایی و تأثیر آن بر فرونشست اشاره کرده‌اند. بر اساس نقشه فاصله از گسل‌ها، بیشترین میزان فرونشست‌ها در فاصله بیش از ۲۰۰۰ متری واقع شده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر پایین این لایه بر روی وقوع فرونشست در آبخوان دشت کاشان است. نادری و همکاران (۱۳۹۷) طی تحقیقی در سلماس نیز به اهمیت پایین گسل بر روی فرونشست اشاره کرده‌اند. این در حالی است که مختاری و همکاران (۱۳۹۸) در تسوج، محمدی و همکاران در دشت سمنان (۲۰۱۹) و تین‌بویی و همکاران (۲۰۱۸) در کره جنوبی به اثرات تشدیدکننده گسل روی فرونشست اذعان کرده‌اند. بر اساس نقشه شیب دشت کاشان، تعداد ٦۷ فرونشست در شیب کمتر از ۵/۷ درصد واقع شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده این است که در شیب‌های پایین‌تر، خطر وقوع فرونشست بیشتر است

که مختاری و همکاران (۱۳۹۸) و محمدی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به این مورد اشـاره کرده‌اند. دلیل این امر می‌تواند این باشـد که در شـیب‌های پایین، امکان تشـکیل آبخوان بیشتر است و لذا بر اثر برداشت آب در این مناطق، احتمال وقوع فرونشـسـت بیشتر است. لازم به ذکر است که تین‌بویی و همکاران (۲۰۱۸) و رحمتی و همکاران (۲۰۱۹a) به اهمیت پایین‌تر شیب نسبت به سایر شاخص‌ها اشاره کرده‌اند. نتایج نشان داد که تعداد ۷۶ مورد فرونشست در ارتفاع بین ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ متر واقع شـده‌اند و در ارتفاعات بالاتر، میزان وقوع فرونشـسـت صفر بوده است که در تحقیقات محمدی و همکاران (۲۰۱۹)، اهمیت این شـاخص و اثرگذاری آن بر فرونشست بیان شده است. لایه کاربری اراضی نشـان داد که تعداد ٦۵ مورد از فرونشـسـت‌ها در اراضـی بایر و کشـاورزی واقع شـده‌اند و این مورد نشـان‌دهنده حسـاسـیت این دو کاربری بر میزان وقوع فرونشـسـت اسـت که نادری و همکاران (۱۳۹۷)، تین‌بویی و همکاران (۲۰۱۸) و محمدی و همکاران (۲۰۱۹) به این مهم اشـاره کرده‌اند. یکی از علل این موضـوع، برداشـت منابع آب زیرزمینی در مناطق کشـاورزی برای زراعت است که در پژوهش قره‌چلو و همکاران (۱٤۰۰) به آن تأکید شده است. نتایج نشان داد که وقوع فرونشست در مناطقی رخ داده است که انحنای عرضی، طولی و انحنای ترکیبی دارای مقدار پایین‌تری بودند و این شـاخص‌ها اثر معناداری روی فرونشـسـت نداشـته‌اند که محمدی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به اهمیت پایین این شـاخص‌ها اشـاره کرده‌اند. بر اسـاس نقشـه میزان تغییرات سـطح ایسـتابی، تعداد فرونشست‌ها در منـاطقی که میزان این تغییرات بین ۱ الی ۱۰ متر (کاهشـی) بوده؛ بیشـترین مقدار بوده اسـت. افت ۱۰ متری آب زیرزمینی همراه با تراکم چاه‌ها در مرکز، شمال شرق و جنوب شرق دشت باعث فرونشست بیشتر در این مناطق شده اسـت. تغییرات سـطح آب زیرزمینی یک از مهم‌ترین شـاخص‌های تأثیرگذار بر فرونشست منطقه مطالعاتی است که اهمیـت این لـایه در تحقیقات مختاری و همکاران (۱۳۹۸)، جانباز فوتمی و همکاران (۱۳۹۹)، قربان‌زاده و همکاران (۲۰۱۸)، محمـدی و همکـاران (۲۰۱۹)، تین‌بویی و همکـاران (۲۰۱۸)، رحمتی و همکـاران (۲۰۱۹a)، کومـار[1] و همکاران (۲۰۲۲) و نگویان[2] و همکاران (۲۰۲۲) نیز تأیید شـده اسـت. بر اسـاس نقشـه تراکم چاه‌ها، تعداد وقوع فرونشست بیشتر در مناطقی رخ داده است که تراکم چاه کمتر از ۱/۳ کیلومتر در کیلومترمربع بوده است که این نتیجه بر خلاف انتظار بوده اسـت. یکی از دلایل این امر می‌تواند برداشـت آب بیشتر از چاه‌هایی که در مناطق با تراکم کمتر چاه قرار گرفته‌اند، باشـد. فرونشـسـت‌های واقع در لایه لیتولوژی نشـان داد که کل فرونشست‌های موجود در سطح آبخوان دشـت در مناطق فلات رسـی، ورقه‌های شـن و ماسـه و تراس‌های قدیمی مشـاهده می‌شـوند. این نتایج نشـان‌دهنده اثرات واحدهای مختلف لیتولوژی و اهمیت این شاخص در بحث فرونشست زمین است که در راستای تحقیقات رحمتی و همکاران (۲۰۱۹a) و تین‌بویی و همکاران (۲۰۱۸) به‌عنوان یک شـاخص مهم و تأثیرگذار اسـت. بر اساس لایه فاصله از آبراهه‌ها، تعداد ٦۵ فرونشست در فاصله ۰ تا ٦۰۰ متر مشاهده شد. در فواصل مختلف آبراهه،

1 Kumar
2 Nguyen

فرونشست‌هایی مشاهده شده است که نشان از اهمیت پایین این شاخص و تأثیرگذاری کم آن روی فرونشست است که با تحقیقات مختاری و همکاران (۱۳۹۸) و رحمتی و همکاران (۲۰۱۹) در یک راستاست. لایه فاصله از جاده‌ها نشان داد که بیشترین میزان وقوع فرونشست در فاصله بیشتر از ۸۰۰ متر رخ داده است و نشان‌دهنده اهمیت پایین این شاخص بر روی فرونشست زمین است که در تحقیقات محمدی و همکاران (۲۰۱۹) به آن تأکید شده است. لایه فاصله از معادن نشان داد که بیشترین میزان وقوع فرونشست در فاصله بین ۴۰۰۰ الی ۸۰۰۰ متر رخ داده است. لازم به ذکر است که در همه فاصله‌ها از معادن موجود، فرونشست‌هایی مشاهده شده است که نشان‌دهنده اثر پایین این شاخص در دشت کاشان است.

همچنین نتایج حاصل از ارزیابی نقشه‌های حاصل از مدل‌های دومتغیره بر اساس داده‌های اعتبارسنجی در منطقه مطالعاتی نشان داد که روش نسبت فراوانی با مقدار AUC برابر با ۰/۸۹۸ دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. پس‌ازآن، مدل‌های آنتروپی شانون، تابع باور شهودی و وزن‌دهی شواهد در رده‌های بعدی از نظر کارایی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که در تحقیقات پرادهان و ابوخاریما (۲۰۱۴)، مدل تابع باور شهودی نسبت به مدل نسبت فراوانی نتایج بهتری را ارائه کرده است.

سایر یافته‌ها نشان داد که مقادیر کارایی مدل‌های دومتغیره در مرحله آموزش مدل بیشتر از مرحله اعتبارسنجی است. برای تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری، نقاط فرونشست به دو دسته آموزش یا ساخت مدل و همچنین اعتبارسنجی تقسیم می‌شوند. در مرحله آموزش، نقشه حساسیت‌پذیری تهیه شده بر اساس حضور نقاط فرونشست در طبقات عوامل به‌دست می‌آید، اما نقاط فرونشست مشاهداتی در مرحله اعتبارسنجی بدون هیچ دخل و تصرفی با نقشه نهایی حساسیت‌پذیری قطع داده می‌شوند. لذا این امر قابل‌انتظار است که دقت در مرحله آموزش بالاتر از مرحله اعتبارسنجی باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای مناسب برای برنامه‌ریزان و مدیران در طرح‌ریزی و اجرای برنامه‌های مختلف برای کاهش خطرات مرتبط با وقوع خطر فرونشست زمین استفاده شود.

کتابنامه

اکبری، محمود؛ ۱۴۰۰. پایش فرونشست زمین تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی و منابع آب با روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: شهر اراک). *نشریه حفاظت منابع آب‌وخاک*. دوره ۱۰. شماره ۳. ۱۱۵-۱۳۱. DOI: 20.1001.1.22517480.1400.10.3.8.7

تیموری، مهدی.، اسدی نیلوان، امید.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی حساسیت و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بروقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: استان لرستان). *نشریه هیدروژئومورفولوژی*. دوره ٦. شماره ۲۱. ۱۵۵-۱۷۹. DOI: 20.1001.1.23833254.1398.6.21.8.3

جانباز فوتمی، مهدیه.، خلقی، مجید.، عبده کلاهچی، عبدالنبی.، روستایی، مه‌آسا.؛ ۱۳۹۹. بررسی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی استان قزوین. *نشریه تحقیقات منابع آب ایران*. دوره ۱٦. شماره ۳. ۱۳۳–۱٤۷.

DOI: 20.1001.1.17352347.1399.16.3.10.8

ذبیحی، محسن.، پورقاسمی، حمیدرضا.، بهزادفر، مرتضی.، ۱۳۹٤. تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و جنگل تصادفی در دشت بجنورد. *نشریه اکوهیدرولوژی*. دوره ۲. شماره ۲. ۲۲۱–۲۳۲.

DOI: 10.22059/ije.2015.56242

رضوی ترمه، سیدوحید؛ شیرانی، کوروش؛ ۱۳۹۷. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، آنتروپی و روش تصمیم‌گیری تاپسیس (مطالعه موردی: حوزه فهلیان، فارس). *نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. سال ۹. شماره ٤. ۱۱۹–۱۳۸.

https://girs.bushehr.iau.ir/article_663411.html

رنجبر، محسن؛ جعفری، نسرین؛ ۱۳۸۸. بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد. *فصل‌نامه علمی جغرافیا*. دوره ٦. شماره ۱۸ و ۱۹. ۱۵٦–۱٦٦.

https://mag.iga.ir/article_253531.html

صابرچناری، کاظم.، بهره‌مند، عبدالرضا.، بردی شیخ، واحد.، ۱۳۹٦. *پهنه‌بندی خطر پتانسیل وقوع فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های آماری (دمپستر- شفر، رگرسیونی، نسبت فراوانی و فاکتور خطر) در حوزه آبخیز قرناوه استان گلستان*. رساله دکتری تخصصی (ph.D). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. گرگان.

https://ganj.irandoc.ac.ir//#/articles/84f0a8feb4d54cc1ff0f4f7332ca73af

عرفانیان، مهدی؛ فرج‌الهی، هانا؛ سوری، مهشید؛ شیرزادی، عطاالله؛ ۱۳۹۵. مقایسه کارایی روش‌های وزن‌دهی شواهد، رگرسیون لجستیک و نسبت فراوانی در تهیه نقشه پتانسیل چشمه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز چهل‌گزی، استان کردستان. *نشریه علوم آب و خاک*. جلد ۲۰. شماره ۷۵. ۵۹–۷۲.

DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.20.75.59

علیخانی، حمید.، شهابی، هیمن.، محمدی، ایوب؛ ۱٤۰۰. *شناسایی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های جاده کوهستانی سنندج- مریوان با استفاده از داده‌های راداری و الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه کردستان.

https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/d98bbfa2068df583c65a9356461b0ed8

فرامرزی، حسن.، حسینی، سیدمحسن.، پورقاسمی، حمیدرضا.، فرنقی، مهدی.، ۱۳۹۹. *ارزیابی مخاطرات محیطی پارک ملی گلستان با استفاده از مدل‌های عامل مبنا و تکنیک‌های یادگیری ماشین*. رساله دکتری تخصصی (ph.D). دانشگاه تربیت مدرس.

https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9a0a14ef1b472a2371e48267b3c99dc8

قاضی‌فرد، اکبر؛ مصلحی، علی؛ صفایی، همایون؛ ۱۳۹۰. بررسی علل ایجاد فرونشست زمین در دشت کاشان و ارائه راه‌کارهای مناسب جهت جلوگیری از آن. طرح پژوهشی دانشگاه اصفهان. کارفرما: شرکت سهامی آب منطقه‌ای اصفهان. ۲۸۳ ص.

https://civilica.com/doc/1273992/

قره‌چلو، سعید؛ اکبری قوچانی، حسام؛ گلیان، سعید؛ گنجی، کامران؛ ۱٤۰۰. ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب‌های زیرزمینی به کمک داده ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ و الوس-۱ (منطقه موردمطالعه: دشت مشهد). *نشریه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. دوره ۱۲. شماره ۳ (پیاپی ٤٤). ۱۱-۱٤.
https://girs.bushehr.iau.ir/article_680336.html

کیانی، فاطمه.، عابدینی، موسی.، احمدزاده، غلامرضا.، ۱۳۹٦. بررسی پتانسیل فرونشست شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS، سومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری و اولین کنفرانس هنر، معماری و مدیریت شهری، تهران. https://civilica.com/doc/688569

محبی تفرشی، غزاله.، نخعی، محمد.، لک، راضیه.، ۱۳۹۹. *ارزیابی تأثیر خصوصیات هیدروژئولوژی دشت ورامین بر فرونشست با تکیه بر مدل‌های ریاضی*. رساله دکتری تخصصی (ph.D). دانشگاه خوارزمی.
https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/19268aee160b125f829a7e106b9ed95a

محمودی‌دهشتران، سیما؛ حجت، آزاده؛ رنجبر، حجت‌الله؛ کریمی نسب، سعید؛. ۱۳۹۵. تعیین محدوده‌های در معرض نشست حاصل از وجود قنات‌های پنهان در محدوده دانشگاه شهید باهنر کرمان با استفاده از سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی. *مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران اهواز*. دوره ٦. شماره ۱۹. ۷۵-۸۱. DOI: 10.22055/aag.2016.12146

مختاری، داود؛ ابراهیمی، حمید؛ سلمانی، سعید؛ ۱۳۹۸. مدل‌سازی خطر وقوع فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه آبریز دشت تسوج). *مجله سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی*. دوره ۱۰. شماره ۳. ۹۳-۱۰۵. https://girs.bushehr.iau.ir/article_668475.html

مرادی، آیدین؛ عمادالدین، حسین؛ آرخی، صالح؛ رضائی، خلیل؛ ۱۳۹۹. تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیزومتری (مطالعه موردی: منطقه شهری ۱۸ تهران). *نشریه تحلیل فضایی و مخاطرات محیطی*. دوره ۷. شماره ۱. ۱۵۳-۱۷٦. DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.11

مصلحی بهارانچی، علی؛ قاضی‌فرد، اکبر؛ روستایی، مه‌آسا؛ صفایی، همایون؛ ۱۳۹۰. بررسی علل ایجاد فرونشست زمین در دشت کاشان و ارائه راه‌کارهای مناسب جهت جلوگیری از آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده علوم. دانشگاه اصفهان.https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/f041a3827a466e058f615c3776591df9

میرزاوند، محمد؛ قاسمیه، هدی؛ ساداتی‌نژاد، سیدجواد؛ باقری، رحیم؛ کلارک، ایان‌داگلاس؛ ۱۳۹۷. *تعیین منشأ و مکانیسم شور شدن آب‌های زیرزمینی دشت کاشان با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی*. رساله دکتری. رشته علوم و مهندسی آبخیزداری. دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین. دانشگاه کاشان. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/e777f2a890e83d0882316cfb1f1e1778

نادری، کیوان؛ ندیری، عطاالله؛ اصغری مقدم، اصغر؛ کرد، مهدی؛ ۱۳۹۷. روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست، مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس. *فصلنامه اکوهیدرولوژی*. دوره ۵. شماره ۱. ۸۵-۹۷. DOI: 10.22059/ije.2017.233252.601

Abdollahi, S., Pourghasemi, HR., Ghanbarian, G., Safaeian, R., 2019. Prioritization of effective factors in the occurrence of land subsidence and its susceptibility mapping using an SVM model and their different kernel functions. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 78(3): 4017–4034. DOI: 10.1007/s10064-018-1403-6.

Al-Abadi, A., Al-Temmeme, A., Al-Ghanimy, A., 2016. A GIS-based combining of frequency ratio and index of entropy approaches for mapping groundwater availability zones at Badra–Al Al-Gharbi–Teeb areas, Iraq, Sustain. Water Resources Management, 2(3): 265-283. DOI:10.1007/s40899-016-0056-5.

Ashraf, H., Cawood, F., 2015. Geospatial subsidence hazard modelling at Sterkfontein Caves. South African Journal of Geomatics. 4 (3): 273-284. DOI: 10.4314/sajg.v4i3.8.

Dehghani, M., Rastegarfar, M., Ashrafi, R., Ghazipour, N., Khorramrooz, H., 2014. Interferometric SAR and geospatial techniques used for subsidence study in the Rafsanjan plain. American Journal of Environmental Engineering. 4 (2): 32–40. DOI: 10.5923/ j.ajee. 20140402.03.

Dempster, A.P., 1967. Upper and lower probabilities induced by a multi valued mapping. The Annals of Mathematical Statistics. 38: 325–339. http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177698950.

Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and Distribution. 17(1): 43–57. https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x.

Galloway, D.L., Burbey, Th.J., 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction, Hydrogeology Journal, 19(8): 1459–1486. https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5.

Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Aryal, J., Gholaminia, K., 2018. A new GIS-based technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system for land subsidence susceptibility mapping. Journal of Spatial Science. 65 (3): 401-418. https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1505564.

Kaitantzian, A., Loupasakis, C., Rozos, D.E., 2014. Assessment of geo-hazards triggered by both natural events and human activities in rapidly urbanized areas. Engineering Geology for Society and Territory, 5: 675–679. DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1_131.

Kumar, H., HassanSyed, T., Amelung, F., Agrawal, R., Venkate, A.S., 2020. Space-time evolution of land subsidence in the National Capital Region of India using ALOS-1 and Sentinel-1 SAR data: Evidence for groundwater overexploitation. Journal of Hydrology. 605: 127329. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127329.

Lee, S., 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators’ landslide susceptibility mapping. Environmental Geology. 52(4): 615-623. DOI: 10.1007/s00254-006-0491-y.

Liang, Y., Gu, K., Shi, B., Liu, S., Wu, J., Lu, Y., Inyang, H., 2022. Estimation of land subsidence potential via distributed fiber optic sensing. Engineering Geology. 298: 106540. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106540.

Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Amiri, M., 2019. Land subsidence susceptibility assessment using random forest machine learning algorithm. Environment Earth Science. 78 (16): 503. DOI: 10.1007/s12665-019-8518-3.

Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S., Rezaei, A., 2014. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon’s entropy models in the Moghan watershed, Iran. Journal of Earth Sciences. 8(1): 171-186. DOI: 10.1007/s12145-014-0145-7.

Nguyen, M., Lin, Y.N., Tran, Q.C., Ni, Ch., Chan, Y., Tseng, K., Chang, Ch., 2022. Assessment of long-term ground subsidence and groundwater depletion in Hanoi, Vietnam. Engineering Geology. 299: 106555. DOI:10.1016/j.enggeo.2022.106555.

Ozdemir, A., Altural, T., 2013. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW

Turkey. Journal of Asian Earth Sciences. 64: 180-197. https://doi.org/10.1016/ j.jseaes. 2012.12.014.

Park, NW., 2010. Application of Dempster-Shafer theory of evidence to GIS-based landslide susceptibility analysis. Environmental Earth Science. 62(2): 367-376. DOI: 10.1007/s12665-010-0531-5

Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modeling. 190(3-4): 231-259. https:// doi.org/ 10.1016/ j.ecolmodel.2005.03.026.

Pourghasemi, H.R., Mohammady, M., Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. Catena. 97: 71-84. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.005.

Pradhan P, Abokharima, M.H. Jebur, M.N. Shafapour Tehrany, M. 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta valley (Malaysia) using the Evidential Belief Function Model in GIS. Natural Hazards, 73 (2): 1019-1042. DOI:10.1007/s11069-014-1128-1.

Pradhan, B., Lee, S., 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: back propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. Environmental Modelling & Software. 25(6): 747–759. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.016.

Rahmati, O., Falah, F., Naghibi, S.A., Biggs, T., Soltani, M., Deo, R.C., Cerda, A., Mohammadi, F., Tien Bui, D., 2019a. Land subsidence modelling using tree-based machine learning algorithms. Science of the Total Environment. 672: 239–252. https:// doi.org/ 10.1016/ j.scitotenv.2019.03.496.

Rahmati, O., Golkarian, A., Biggs, T., Keesstra, S., Mohammadi, F., Daliakopoulos, I.N., 2019b. Land subsidence hazard modeling: Machine learning to identify predictors and the role of human activities. Journal of Environmental Management. 236: 466–480. https:// doi.org/ 10.1016/j.jenvman.2019.02.020.

Shafapour Tehrany, M., Shabani, F., Neamah Jebur, M., Hong, H., Chen, W., Xie, X., 2017. GIS-based spatial prediction of flood prone areas using standalone frequency ratio, logistic regression, weight of evidence and their ensemble techniques. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 8 (2): 1538-1561. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1362038.

Shafer, G.A., 1976. Mathematical theory of evidence. Princeton University Press. ISBN 0-608-02508-9. p. 314. https://www.jstor.org/stable/j.ctv10vm1qb.

Shi, X., Jiang, S., Xu, H., Jiang, F., He, Z., Wu, J., 2016. The effects of artificial recharge of groundwater on controlling land subsidence and its influence on groundwater quality and aquifer energy storage in Shanghai, China. Environmental Earth Sciences. 75(3): 1-18. DOI: 10.1007/s12665-015-5019-x.

Sun, J., Guo, E., Yang, X., Kong, Y., Yang, L., Liu, H., Lin, X., 2023. Seasonal and spatial variations in soil biochemical properties in areas with different degrees of mining subsidence in Central China. CATENA. 224: 106984. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106984.

Tien Bui, D.T., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Pradhan, B., Chen, W., Khosravi, Kh., Panahi, M., Ahmad, B.B., Lee, S., 2018. Land subsidence susceptibility mapping in South Korea using Machine Learning Algorithms. Sensors. 18(8): 2464. DOI: 10.3390/s18082464.

Tweed, S.O., Leblanc, M., Webb, J.A., Lubczynski, M.W., 2007. Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. Hydrogeology Journal. 15(1): 75-96. DOI:10.1007/s10040-006-0129-x.

Ty, T.V., Minh, H.V.T., Ram Avtar, R., Kumar, P., Hiep, H.V., Kurasaki, M., 2021. Spatiotemporal variations in groundwater levels and the impact on land subsidence in CanTho, Vietnam. Groundwater for Sustainable Development. 15: 100680. https:// doi.org/ 10.1016/

j.gsd.2021.100680.

Yu, H., Gong, H., Chen, B., Liu, K., Gao, M., 2020. Analysis of the influence of groundwater on land subsidence in Beijing based on the geographical weighted regression (GWR) model. Science of The Total Environment. 738: 139405. https:// doi.org/ 10.1016/ j.scitotenv. 2020.139405.

Zamanirad, M., Sarraf, A., Sedghi, H., Saremi, A., Rezaee, P., 2020. Modeling the Influence of Groundwater Exploitation on Land Subsidence Susceptibility Using Machine Learning Algorithms. Natural Resources Research. 29(2): 1127-1141. https://doi.org/10.1007/s11053-019-09490-9.

Zhou, Y., Li, W., 2011. A Review of regional groundwater flow modeling. Geoscience Frontiers. 2(2): 205-214. DOI: 10.1016/j.gsf.2011.03.003.

Zhu, L., Zhua, L., Gonga, H., Chen, Y., Wang, Sh., Ke, Y., Guo, G., Li, X., Chen, B., Wang, H., Teatini, P., 2020. Effects of water diversion project on groundwater system and land subsidence in Beijing, China. Engineering Geology. 276: 105763. DOI: 10.1016/ j.enggeo. 2020.105763.